NUMERO MONOGRAFICO



INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ENERGIA, PRESENTE Y FUTURO

- ENERGIA Y CAMBIO CLIMATICO
- LIMITACION DE LAS EMISIONES DE CARBONO
- COMBUSTIBLE PARA EL TRANSPORTE
- AHORRO ENERGETICO
- OPCION NUCLEAR
- ENERGIAS RENOVABLES
- BIOETANOL







Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Noviembre de 2006

Número 362

















EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *Combustibles para los transportes del futuro*, *Buenas expectativas para el hidrógeno*, *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Juan P. Adrados: *Aumento del rendimiento y ahorro energético*; Luis Bou: *¿Qué hacer con el carbón?*, *Auge de las energías renovables*, *Un plan B para la energía*; Ramón Pascual: *La opción nuclear*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Phil Saunders, *Space Channel Ltd.*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

De qué va "el juego". «Nuestra hipótesis de trabajo era que, cuando dos grupos tienen objetivos encontrados —es decir, cuando uno de ellos puede lograr su meta sólo a expensas del otro—, sus miembros se convierten en enemigos, aunque esos grupos los formen personas normales y equilibradas. Para provocar la fricción entre los grupos de muchachos organizamos un torneo de juegos: béisbol, fútbol "touch" [fútbol americano sin empujones], juego de la cuerda, busca del tesoro, etcétera. El torneo empezó con el mejor ánimo deportivo. Pero una vez iniciado, no tardaron en esfumarse los buenos sentimientos. Los miembros de cada grupo empezaron a tratar a sus rivales de "sucios", "liantes" y "tramposos". Además, cada grupo confeccionó carteles amenazadores, planeó ataques e incursiones contra el otro e hizo acopios secretos de manzanas verdes como munición.» —Muzaf Sherif

...cien años

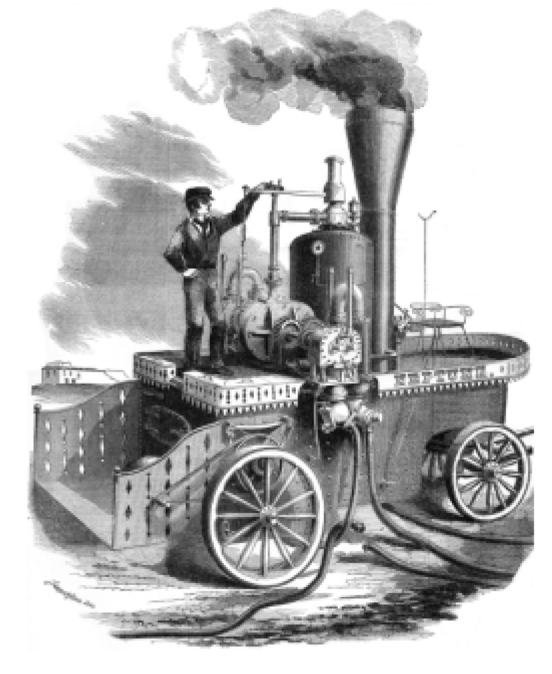
Santos-Dumont vuela. «A mediodía del 23 de agosto, Alberto Santos-Dumont manejó su aeroplano por el aire una distancia de casi cincuenta metros y a una altura de seis metros sobre el suelo. El experimento tuvo lugar cerca de París y fue presenciado por una multitud, incluida una representación del Aero Club de Francia. Según el relato cablegrafiado, la estabilidad de la máquina se mostró buena. En todo caso, es éste el primer vuelo de un aeroplano a motor tripulado que se efectúa ante un número considerable de personas. Comparando estos resultados con los que los hermanos Wright declaran haber conseguido, resalta un hecho chocante, a saber, que el joven brasileño halló necesario un motor de cincuenta caballos para hacer que su máquina se elevara; los Wright, en cambio, con una máquina de peso doble y una potencia de la mitad afirman haber conseguido una velocidad casi doble.»

La edad del acero. «Pocas veces en la historia de las industrias modernas, si es que alguna, se ha presenciado una situación tan extraordinaria como la que ahora tiene ante sí la industria de EE.UU. Las acerías, dedicadas a la producción de acero estructural, están sobrecargadas de trabajo. La situación es aún más crítica en las plantas de chapa, la demanda de cuya producción debe atribuirse a la creciente aceptación de los coches de acero.»

Carne para los pobres. «El *freibänk* es una institución peculiar alemana que a los ojos norteamericanos resulta cualquier cosa menos atractiva. Se trata de una tienda dedicada a la venta pública, aprobada por las autoridades, de carnes que se declararon no aptas para el consumo y que mediante la esterilización han adquirido la condición de sanas. Por ejemplo, una carne con larvas de tenia se somete a una refrigeración prolongada, mientras que una carne con tuberculosis se calienta a gran temperatura en recipientes herméticos. Los precios de las carnes que se venden en un *freibänk* los fijan las autoridades locales; la cantidad que puede venderse a cada cliente está limitada. No existen en Francia tales establecimientos, pero se señala que la ley de la oferta y la demanda crea unos *freibänke* de índole muy distinta, en los que se vende carne inadecuada como alimento a unos compradores que no pueden permitirse adquirir otras.»

...ciento cincuenta años

Coche de bomberos de vapor. «El grabado adjunto representa el Coche de Bomberos Rotatorio de Vapor *Neptuno*, construido en los Talleres Island, de Seneca Falls (Nueva York). En este ingenio contra incendios los émbolos elípticos rotatorios operan en el motor y en la bomba. En el Concurso de Bomberos celebrado en Seneca Falls entre el 10 y el 11 de septiembre pasado, lanzó dos chorros de cuatro centímetros a una distancia de más de 50 metros horizontales.»



El coche de bomberos *Neptuno*, movido por vapor, 1856.

Acero barato. «H. Bessemer ha conseguido una patente norteamericana para su mejora en la fabricación de hierro. La reivindicación se basa en un descubrimiento científico vinculado a la manufactura del acero; a saber, provocar una combustión sin combustible, mediante la insuflación de aire, vapor u otros gases a través del hierro fundido contenido en una cuba, que él llama convertidor, para suministrar oxígeno al carbono contenido en el metal fundido en bruto y quemar así el exceso de carbono. La reivindicación no es que él sea el primero en emplear aire o vapor de ese modo, sino que descubrió cuál es la causa del efecto que se produce al impulsar gases oxigenados a través de hierro fundido.»

GESTION DE LA ENERGIA

Entierro en Frio del CO_2

El entierro del dióxido de carbono podría llegar a ser un importante medio para frenar el calentamiento global. Los acuíferos salinos —formaciones areniscas cuyos poros están llenos de agua salada— cuentan entre los lugares de enterramiento mejores y más aceptados. Las técnicas de inyección de dióxido de carbono en el suelo son bien conocidas: las compañías petroleras llevan 30 años sirviéndose de ese método para extraer más petróleo de pozos ya agotados. Las dudas se refieren a la manera de inyectarlo en grandes cantidades y de guardarlo mucho tiempo. Para investigar en condiciones controladas el comportamiento del CO_2 enterrado en un acuífero salino, se han bombeado tres mil toneladas de dióxido de carbono, convertidas por compresión en un fluido supercrítico y calentadas a 15 grados Celsius, en la formación geológica Frio, de Texas. Se las ha introducido a unos 1600 metros por debajo de la superficie terrestre en el interior de una capa de piedra arenisca de 23 metros de espesor. Las imágenes sismológicas tridimensionales y las obtenidas por otros métodos de control muestran que el CO_2 inyectado en Frio ha quedado retenido en los poros o se ha disuelto en el agua salina. Pero se ha descubierto también que el dióxido de carbono disuelto acidificaba más el agua. Esta, entonces, disolvía parte de los minerales de la arenisca, liberando calcita y metales, hierro sobre todo. El efecto podría ser bueno y malo a la vez. La disolución de parte de la roca deja sitio para almacenar más dióxido. Pero los metales liberados podrían migrar a la superficie y plantear un problema ecológico. Algunos acuíferos salinos, por ejemplo, pueden contener arsénico y uranio, que sería mejor no perturbar. Con todo, los acuíferos salinos bien impermeabilizados son unos excelentes lugares para almacenar CO_2 (con cementos resistentes a los ácidos en los pozos de inyección).

—*Rebecca Renner*

Bombeo de dióxido de carbono en estado fluido supercrítico en la formación geológica Frio, en Texas.



La plataforma Sleipner del mar del Norte lleva diez años inyectando anualmente un millón de toneladas de dióxido de carbono en un acuífero salino de gran espesor. Pero un proyecto industrial de este tipo no es lo más adecuado para obtener datos científicos.



ASTRONOMIA

El lado gordo de la Luna

La cara oculta de nuestro satélite se abulta en el ecuador, peculiaridad que desde hace tiempo desconcierta. Se conjeturaba que esa expansión se creó cuando se solidificaron los océanos de magma que cubrían una Luna joven, a la vez que los deformaban la gravedad y la rotación propia. Pero esta hipótesis tropezaba con la discrepancia entre las teorías acerca de la primitiva órbita lunar y las dimensiones exactas del abultamiento. Un grupo de investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts acaba de aportar la siguiente explicación: el abultamiento se justifica si se acepta que, transcurridos de 100 a 200 millones de años de su constitución, la Luna se hallaba a la mitad de la distancia de la Tierra que ahora y se acepta, además, que en esa misma época su órbita era más ovalada, parecida a la actual de Mercurio, con sus tres rotaciones por cada dos revoluciones. Hubo un tiempo, prosiguen, en que la Luna, vista desde la Tierra, pasaba por sus fases en 18 horas nada más y levantaba mareas cuatro veces al día, hasta diez veces más enérgicas que las actuales.

—*Charles Q. Choi*

SUSAN D. HOVORKA *Bureau of Economic Geology, Universidad de Texas en austin (arriba, izquierda)* STATOIL *(arriba, derecha)*; APOLO XVI, NASA *(abajo)*

BIOLOGIA

¿Qué hacen las mariposas ante la lluvia?

Esquivarla. Que a una mariposa monarca, que pesa 500 miligramos, le alcance una gota de lluvia, 70 miligramos de agua, equivale a que nos cayeran encima esferas líquidas que pesasen más del doble que una bola de la bolera. Las tormentas dificultan la movilidad de las mariposas. Cuando levantan el vuelo exponen las alas a la luz solar directa, que rápidamente calienta los músculos involucrados. Pero los cielos encapotados bloquean la radiación solar. Así pues, cuando el firmamento se oscurece, las mariposas buscan refugio en sus posaderos: lugares protegidos, como hierbas altas o plantas frondosas. Cuando vuelve a salir el sol, reemprenden sus revoloteos y cortejos en cuestión de minutos.

—Michael Raupp,
Universidad de Maryland



La lluvia es peligrosa para las mariposas.

ENERGIA

Reactores rápidos y térmicos

Además de generar energía, como la gran mayoría de los reactores, los reactores nodriza rápidos crean hasta un 30 por ciento más de combustible del que consumen. Los reactores nucleares generan la energía por fisión, proceso por el cual los núcleos atómicos se escinden en dos o más núcleos más pequeños. En la fisión, una pequeña fracción de la masa se convierte en energía, que el reactor aprovecha mediante una reacción, controlada, en cadena. Cada núcleo al desintegrarse produce dos o más neutrones, que otros núcleos absorben, lo que a su vez provoca su fisión. Cuando sucesivamente se liberan más neutrones, tiene lugar una fisión continua. Esta produce unos neutrones de alta energía que se mueven a gran velocidad. Pero esos neutrones rápidos mantienen la fisión mucho peor que los que se mueven a energías equiparables a la energía correspondiente a la temperatura del reactor (los neutrones térmicos). De ahí que la mayoría de los reactores empleen un moderador, habitualmente agua o helio, para lentificarlos hasta esas energías óptimas. En contraposición a estos reactores térmicos, los reactores rápidos emplean refrigerantes menos eficientes, como el sodio líquido, para que los neutrones conserven mucha energía. Aunque esos neutrones rápidos no producen la fisión con la misma eficacia, ofrecen una ventaja colateral: los captura fácilmente el isótopo 238 del uranio. No hemos de confundir este isótopo con el uranio 235, mucho más raro. El uranio 238 no se fisiona con neutrones térmicos. Se transforma en plutonio 239. Si se rodea un núcleo de plutonio 239, o de mezcla de plutonio y uranio, con uranio 238, se puede llegar a producir más combustible (el plutonio) del que se gasta: así ocurre en un reactor nodriza.

—P. Andrew Karam
MJW Corporation (Nueva York)

MATT COLLINS (*abajo*)

Energía y cambio climático

El calentamiento global es innegable. Para limitarlo, habrá que modificar las técnicas energéticas y adoptar políticas diferentes de las actuales

Gary Stix

RESUMEN

■ No hay mes en que no se publiquen artículos e informes sobre los peligros del cambio climático; nos dicen que amenazan a las especies marinas, que aumenta la gravedad de los incendios no provocados o que aumenta la toxicidad de la hiedra.

■ La puesta en práctica de medidas que limiten el calentamiento global supone un desafío mayor que el Proyecto Manhattan.

■ En los artículos que componen este número monográfico, diversos especialistas exponen técnicas de producción de energía y modos de consumirla que podrían reducir el carbono que se acumula en la atmósfera terrestre.

Siglo tras siglo, exploradores extenuados, presas del escorbuto, han fracasado en su empeño de encontrar un "paso del Noroeste", un camino entre el Atlántico y el Pacífico a través de los hielos árticos. Pero dentro de 40 años, o quizá mucho antes, unas temperaturas mayores podrían hacer realidad el sueño de Francis Drake y el capitán Cook, y dejar expedita una ruta comercial que compita con el canal de Panamá.

La apertura de vías de navegación por el Artico figuraría entre los efectos benignos del cambio climático acelerado. Por el contrario, la fusión de los glaciares, las alteraciones de la corriente del Golfo y las olas de calor sin precedentes nos encaminan hacia catástrofes: inundaciones, plagas, huracanes, sequías; hasta la urticaria de la hiedra venenosa se vuelve más intensa. Cada mes se acumulan informes y artículos sobre los daños que ocasiona el aumento del nivel de carbono en la atmósfera. En un estudio reciente se enumeran los riesgos que corren el coral y otros organismos marinos; en otro, se atribuye al calentamiento un súbito aumento de los incendios naturales en el oeste de EE.UU.

Que hay un calentamiento global, está ya fuera de discusión razonable. Los niveles actuales de dióxido de carbono —cerca de 400 partes por millón (ppm) en la atmósfera terrestre— son los más altos de los últimos 650.000 años y, si no se interviene radicalmente, sobrepasarán con facilidad las 500 ppm hacia 2050.

Sin los gases de invernadero —el vapor de agua, el dióxido de carbono y el metano sobre todo—, parte del calor recibido de la radiación solar volvería al espacio y este planeta no acogería protozoos, ni otros organismos. Pero si bien esos gases son en sí buenos, su exceso, en concreto el del dióxido de carbono emitido por coches y centrales térmicas, está produciendo una subida constante de la temperatura. De los veinte años más calurosos registrados, en su mayoría son posteriores a 1980.

Se ignora qué ocurrirá si se sigue el curso actual. No puede predecirse con precisión


1. LAS EMISIONES de carbono están calentando nuestro planeta.

CARY WOLINSKY (*fotografía*); JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración*)

la fecha exacta en que un casquete polar completará el cambio de la fase sólida a la líquida, razón por la cual la Administración Bush y los grupos escépticos ante la realidad del calentamiento pregonan todavía la incertidumbre del cambio climático. Pero no hay climatólogo que quiera comprobar qué sucedería si los niveles de dióxido de carbono rebasasen ampliamente las 500 ppm.

Acuerdos internacionales

Impedir que la atmósfera terrestre pase de invernadero a estufa representa tal vez el reto científico y técnico más imponente que jamás se le haya planteado a la humanidad. Habrá que echar mano, al menos durante un siglo, de todo lo que la ingeniería y la gestión política puedan ofrecer para frenar el aumento de las emisiones de carbono. Comparados con la magnitud de este empeño, una misión lunar o un Proyecto Manhattan parecen sencillos.

El cambio climático obliga a reestructurar radicalmente la economía mundial de la energía. La preocupación por la penuria de combustibles fósiles sólo apremiará cuando se quiera proteger el clima. Incluso en el caso de que la producción de crudo tocase techo pronto (hipótesis discutible, si pensamos en las arenas asfálticas de Canadá, el crudo pesado de Venezuela y otros tipos de reservas), el carbón y sus derivados podrían sacar de apuros al mundo durante más de un siglo. Pero los combustibles fósiles, que cubren más del 80 por ciento del consumo de energía mundial, se convierten en una cruz cuando se persigue limitar las emisiones globales de carbono.

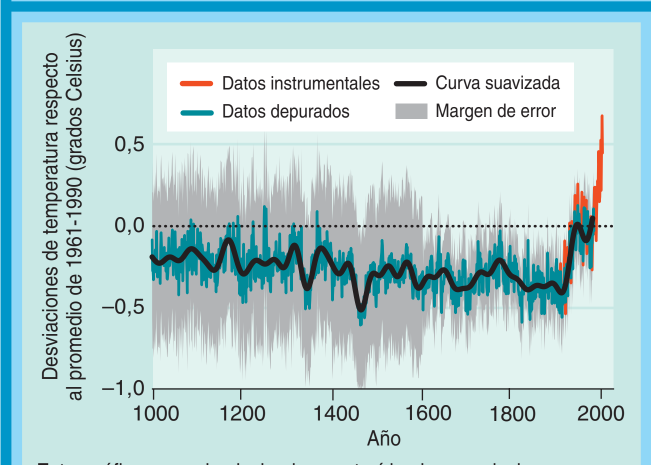
Convertir el consenso científico sobre el cambio climático en medidas para hacerle frente sitúa el debate en uno de esos campos de minas políticos donde tantas veces, desde los tiempos de la Sociedad de Naciones, han fracasado los esfuerzos por llegar a formas internacionales de gestión. Estados Unidos, con menos del 5 por ciento de la población mundial, produce casi el 25 por ciento de las emisiones de carbono y ha saboteado el Protocolo de Kioto, que obliga a reducir las emisiones de gases de invernadero en un 7 por ciento con respecto a los niveles de 1990.

Sin embargo, uno de los principales motivos de la oposición de EE.UU. al tratado —que no exija a los países en vías de desarrollo que limiten sus emisiones— tendrá aún mayor peso ante el convenio que habrá de suceder al de Kioto; éste expira en 2012. El imparable crecimiento económico de China e India provocará que los países industrializados les pidan restringir las emisiones de carbono. A ello esas dos naciones opondrán: los ciudadanos de Shenzhen y Hyderabad se merecen las mismas oportunidades para su desarrollo económico que los de Detroit y Frankfurt.

Quizás en Kioto se haya cubierto una etapa inicial imprescindible, aunque sólo sea por haber señalado el espinoso camino a recorrer. Pero la estabilización de las emisiones de carbono exigirá planes más concretos, con los que se siga nutriendo el crecimiento económico mientras se edifica una infraestructura energética menos asociada al carbono.

MAS CALOR

Un senador de EE.UU. calificó el calentamiento global como "la tomadura de pelo más pesada" que jamás haya sufrido el pueblo de esa nación. Pese a su retórica estridente, los escépticos encuentran cada vez menos argumentos en que apoyarse: no deja de crecer el respaldo científico a la idea de que se está produciendo un calentamiento antropogénico.



Esta gráfica en palo de hockey, extraída de uno de los numerosos estudios que demuestran el brusco aumento reciente de las temperaturas medias, ha sido muy criticada por quienes dudan de que haya un calentamiento resultante de la actividad humana. Han puesto en entredicho los datos en que se apoya. Sin embargo, un informe emitido en junio por el Consejo Nacional de Investigación de EE.UU. ratifica, con un "elevado margen de confianza", que las temperaturas de los últimos 25 años son las mayores de los últimos 400; y, añade, es verosímil que sean las mayores desde hace mil.

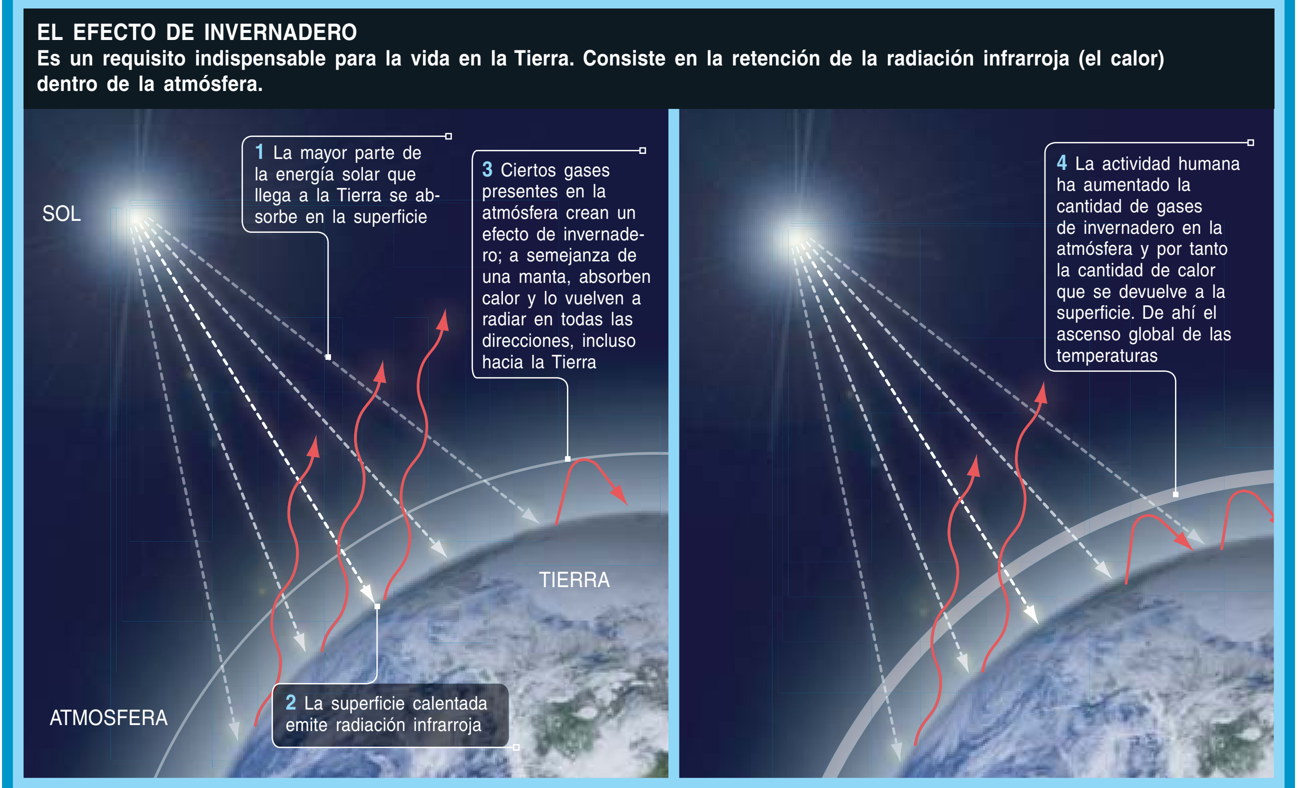


Esta flotilla de vehículos simboliza el alto consumo per cápita de energía en EE.UU. Pero se espera que también aumente en los países en vías de desarrollo. Muchos chinos sueñan en cambiar su bicicleta por un coche.



EL EFECTO DE INVERNADERO

Es un requisito indispensable para la vida en la Tierra. Consiste en la retención de la radiación infrarroja (el calor) dentro de la atmósfera.



JEN CHRISTIANSEN, FUENTE: *IPCC THIRD ASSESSMENT REPORT* (*gráfico*); RICHARD MICHAEL PRUITT *Dallas Morning News/Corbis* (*todoterrenos*); FREDERIC J. BROWN *AFP/Getty Images* (*China*); LUCY READING-IKKANDA (*ilustraciones*)

Los grupos empresariales que defienden la energía nuclear o un uso del carbón menos contaminador abogan por una sola vía para llegar a una energía limpia. Pero dedicar antes de tiempo demasiados recursos a una técnica concreta podría conducir a soluciones erróneas y cortarle las alas al esfuerzo por reducir de modo permanente las emisiones de carbono. La diversificación es el fundamento del plan que Robert H. Socolow y Stephen W. Pacala exponen en este número especial de *Investigación y Ciencia*. Estos profesores de la Universidad de Princeton describen la manera de estabilizar las emisiones de carbono hacia mediados del siglo gracias a un conjunto de técnicas y estrategias de naturaleza variada.

Quizás un gran avance en las células solares lleve a una nueva era fotovoltaica, en la que una planta siderúrgica y un usuario de teléfono móvil obtendrían de un mismo tipo de generador la potencia que necesiten. Pero si esto no sucede —es lo más probable—, habrá que recurrir a técnicas muy diversas (combustibles biológicos, paneles solares, pilas de hidrógeno y reactores nucleares) para generar energía con una baja emisión de carbono. Destacados expertos perfilan aquí esos distintos enfoques, y también ideas más radicales, entre ellas las plantas fotovoltaicas en el espacio exterior y los reactores de fusión nuclear, que podrían entrar en funcionamiento si los profetas de hoy quedan por miopes dentro de 50 años.

Cambiar el rumbo

Planificar a 50 o 100 años vista tal vez sea un anhelo imposible. La tenue esperanza de mantener por debajo de 500 ppm el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera depende de que los gobiernos adopten programas que fomenten el rendimiento energético. Para apartarse del rumbo actual, EE.UU. debe seguir el ejemplo de Europa, e incluso el de algunos de los estados de los propios EE.UU., y gravar el carbono, sea con un impuesto sobre las emisiones o mediante un sistema de *cap-and-trade* parecido al del Tratado de Kioto (los emisores de carbono sólo pueden verter CO_2 a la atmósfera hasta una cierta cantidad; para emitir más, han de comprar en el libre mercado derechos de emisión a quienes emitan menos de lo permitido). Se ganaría así tiempo, hasta que se establecieran programas de investigación, con presupuestos equiparables a los militares, capaces de crear alternativas a los combustibles fósiles. (Nueve estados de la Costa Este preparan su propio programa de mercadeo de derechos, la Iniciativa Regional sobre los Gases de Invernadero).

Las previsiones a cincuenta años sólo ocupan a los futurólogos, no a los políticos pragmáticos. Para entonces, quizás una nueva y milagrosa técnica resuelva nuestros problemas climáticos y energéticos, pero, al menos con igual probabilidad, podría haber ocurrido algo bien distinto: que un fracaso del acuerdo de Kioto, o reyertas internacionales por cuestiones del clima, hubiesen incitado a generar electricidad quemando carbón, y alimentar los medios de transporte con combustibles sintéticos, sin voluntad alguna de controlar las emisiones de carbono.

Un coro permanente de escépticos continúa sembrando dudas sobre la copiosa bibliografía científica en que se fundamenta el consenso en materia de calentamiento global. “Lo llaman contaminación; nosotros lo llamamos vida”, proclama el Instituto de la Empresa Competitiva en un anuncio que canta las excelencias del dióxido de carbono. Sin duda persistirán las incertidumbres sobre el alcance y la rapidez del calentamiento, pero la pasividad podría hacer más daño que el temido perjuicio económico que acarrearía una precaución excesiva. Si esperamos a que desaparezca un casquete polar, será ya demasiado tarde.





2. ANTES Y AHORA: El glaciar Sunset, en el Parque Nacional Denali de Alaska, cubría una ladera montañosa en agosto de 1939. Sesenta y cinco años más tarde, también en agosto, había desaparecido casi por completo.

McINTYRE *AP Photo/National Park Service (arriba)*; R. D. KARPILO *AP Photo/National Park Service (abajo)*

Bibliografía complementaria

THE END OF OIL: ON THE EDGE OF A PERILOUS NEW WORLD. Paul Roberts. Houghton Mifflin, 2004.

KICKING THE CARBON HABIT. William Sweet. Columbia University Press, 2006.

AN INCONVENIENT TRUTH. Al Gore. Rodale, 2006.

1. LA HUMANIDAD TIENE QUE ELEGIR ENTRE DOS FUTUROS: no hacer nada para refrenar las emisiones de dióxido de carbono (lo que encierra enormes riesgos climáticos) o limitarlas. La segunda opción promete costes y beneficios.

Plan para estabilizar las emisiones de carbono

Impedir que las emisiones de gases de invernadero sigan aumentando es una tarea imponente, aunque no imposible. Existen ya las técnicas adecuadas y no hay tiempo que perder

Robert H. Socolow y Stephen W. Pacala

Glaciares en retroceso, huracanes más violentos, veranos tórridos y osos polares enflaquecidos: los ominosos presagios de las consecuencias del calentamiento global incitan a un cambio sin precedentes en el uso de los combustibles fósiles. Durante dos siglos se ha estado enviando a la atmósfera, con celeridad creciente, carbono que yacía bajo la superficie terrestre. Las industrias del carbón, el petróleo y el gas natural extraen en todo el mundo alrededor de siete mil millones de toneladas de carbono al año, que se queman casi en su totalidad y trasladan a la atmósfera ese elemento químico en la forma de dióxido de carbono (CO_2). Ahora, está arraigando la convicción de que, aunque sea por prudencia, conviene invertir la tendencia ascendente de las emisiones de este gas.

Parece que nos acercamos al límite que separa las emisiones con consecuencias realmente peligrosas de las que sólo producen inconvenientes. La frontera coincide con una concentración de CO_2 en la atmósfera cercana al doble de la que existía en el siglo XVIII, antes de iniciarse la revolución industrial. Todo aumento de la concentración trae nuevos riesgos, pero si se evita esa zona de peligro se reducirá la probabilidad de que se desencadenen cambios climáticos radicales e irreversibles, como la desaparición del casquete de hielo de Groenlandia. Hace dos años formulamos un sencillo esquema que liga las futuras emisiones de CO_2 a ese objetivo.

Comparamos dos predicciones a 50 años vista. Según la primera, las emisiones seguirían creciendo otros 50 años al mismo ritmo de los últimos 30 y en 2056 llegarían a los 14.000 millones de toneladas de carbono al año. (Resultan verosímiles valores superiores e inferiores.) Llegados a ese punto, sería muy difícil evitar que se triplicaran las concentraciones de CO_2 de la era preindustrial, ni siquiera con un esfuerzo concertado por reducir las emisiones mundiales durante los 100 años siguientes.

La segunda predicción congela las emisiones en el nivel actual de 7000 toneladas anuales durante los próximos 50 años y prevé su reducción a la mitad en los 50 siguientes. De esta manera se evitaría la duplicación del nivel de CO_2.

Llamamos triángulo de estabilización al espacio comprendido entre estas curvas de emisión a 50 años, una ascendente y otra llana.

KENN BROWN

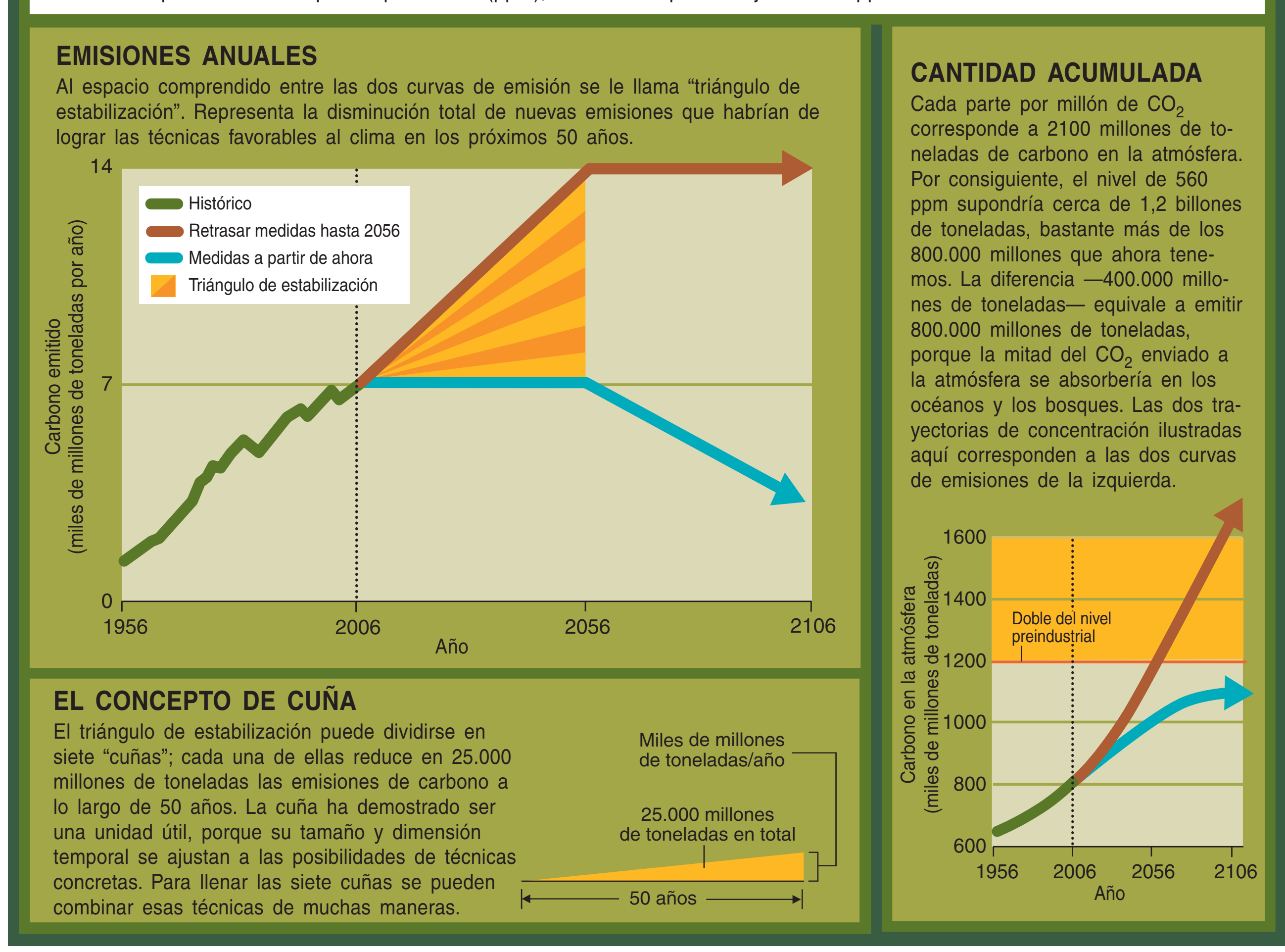
RESUMEN

■ La humanidad no puede arrojar cantidades ilimitadas de dióxido de carbono a la atmósfera sin que el clima entre en una fase desconocida en la historia geológica reciente. El riesgo crece a medida que los niveles de CO_2 se acercan al doble del valor que tenían antes del siglo XIX.

■ Para que el problema resulte abordable, la reducción requerida de las emisiones puede fragmentarse en "cuñas": reducciones de una misma magnitud conseguidas de distintas formas, acordes con la técnica disponible.



Mantener constantes las emisiones globales mientras la economía del mundo sigue creciendo es una tarea imponente. En los últimos 30 años, las emisiones de carbono crecieron porcentualmente la mitad que el producto bruto mundial, que ha estado subiendo un 3 por ciento anual. Por tanto, la razón entre las emisiones de carbono y el producto bruto mundial, la "intensidad en carbono" de la economía mundial, cayó cerca del 1,5 por ciento al año. Para que las emisiones globales en 2056 sean iguales a las de hoy, la intensidad en carbono no tendrá que ir cayendo a la mitad sino a toda la velocidad a que crezca la economía mundial.



Es seguro que, a largo plazo, se mantendrán dos tendencias favorables. Por la primera, al ser más ricas las sociedades crecerá la importancia del sector de servicios —educación, sanidad, ocio, bancos y otros—, frente a las actividades de gran contenido energético, como la producción de acero. Con eso, ya desciende la intensidad en carbono de una economía.

La segunda tendencia establece que el ingenio sustituye a la energía. Es una tendencia muy arraigada en la evolución técnica. No ha habido que construir centenares de nuevas centrales de energía porque se ha invertido en frigoríficos, climatizadores y motores de rendimiento muy superior a los de hace veinte años. No ha habido que explotar cientos de nuevos campos petrolíferos y de gas porque los motores de aviación consumen menos combustible y las viviendas calentadas por gas pierden menos calor por las ventanas.

El objetivo de mantener constantes las emisiones globales sería inalcanzable si no fuera porque los coches y aviones de 2056 aún no están diseñados, ni construidos la mayoría de los edificios de entonces, ni elegido el lugar de las urbanizaciones donde se levantarán, ni determinado, pues, qué desplazamientos habrán de efectuar quienes las habiten. E inalcanzable sería también si no fuese porque los empresarios del sector apenas han empezado a proyectar las centrales eléctricas necesarias para dar luz a esas viviendas futuras. El sistema energético actual, de notoria ineficacia, se reemplazará si el mundo presta una atención sin precedentes al rendimiento de la energía. Durante los 50 próximos años podría haber cambios espectaculares: queda mucho por hacer en el campo de la energía.

Para dar viveza a nuestra descripción de cómo cabría reducir las emisiones, dividimos el triángulo de estabilización en siete porciones iguales, que llamamos "cuñas"; cada una de ellas representa mil millones de toneladas que se dejen de emitir por año en 2056 (con respecto a la tendencia actual). Por ejemplo, un coche que recorra al año 16.000 kilómetros con un consumo de 8 litros por cada 100 kilómetros emitirá anualmente cerca de una tonelada de carbono. Los expertos en transporte predicen que en 2056 circularán por el mundo unos

dos mil millones de coches y que cada uno de ellos recorrerá un promedio de 16.000 kilómetros por año. Con ese mismo consumo de 8 litros cada 100 kilómetros, lanzarían por su tubo de escape dos mil millones de toneladas de carbono en un año, mientras que, si su rendimiento se duplicara, consumirían la mitad (4 litros a los 100 kilómetros) y se evitaría la emisión de mil millones de toneladas. Así se podría cubrir una cuña.

Cuñas

En nuestro esquema, sólo consideramos "cuña" una diferencia entre dos posibles situaciones en 2056 que se deba a una política del carbono deliberada. El ritmo actual de crecimiento de las emisiones muestra ya cierta reducción insistente de la intensidad de carbono, pero se quiere reducirla aún más. Por ejemplo, los que confían en que los coches reducirán para 2056 su consumo medio, aunque el mundo no se cuide en absoluto de las emisiones de carbono, a 4 litros por 100 kilómetros no podrán contar esa mejora como una "cuña", pues ya estará implícita en su proyección de referencia.

Además, nos tenemos que ceñir a estrategias que impliquen mejoras de técnicas ya comercializadas en alguna parte del mundo. No nos podemos ir por las nubes. Al concebir lo de las cuñas nos propusimos un objetivo pragmático y realista: contar sólo con soluciones que la ingeniería pueda aportar con bastante certidumbre y no esperar soluciones milagrosas. Sostenemos que se pueden llenar las siete cuñas aun con este par de restricciones, y de varios modos. Cada país —integrado en un marco de cooperación internacional— decidirá a qué cuñas va a dedicarse, según sus capacidades institucionales y económicas, dotación de recursos naturales e inclinaciones políticas.

Por supuesto, las cuñas exigen ideas nuevas, lo mismo en ciencia que en ingeniería, que reduzcan los costes al mínimo y resuelvan los problemas que forzosamente rodean a los cambios técnicos. Aun así, afirmamos que mantener en el nivel actual las emisiones de CO_2 en 2056, sin perjudicar el crecimiento económico, es un resultado deseable y a nuestro alcance.

Acabar con la era de las centrales térmicas de combustión de carbón, tal y como hoy están configuradas, figura en primerísimo lugar del programa de descarbonización ambiental. Debido a razones de seguridad y al encarecimiento del petróleo y el gas natural, el carbón resulta ahora más competitivo como combustible y como fuente de energía eléctrica. No es una bendición: una central térmica de carbón desprende el doble de carbono por unidad de electricidad que una planta de gas natural.

Si no hubiera razones para preocuparse por las emisiones de carbono, las compañías podrían construir en los próximos 50 años varios miles de centrales térmicas grandes (es decir, de más de 1000 megawatt). Setecientas plantas de este tipo emitirían el carbono equivalente a una cuña; si se dejaran de construir, pues, se daría un gran paso hacia la meta de congelar las emisiones de carbono. No hay tiempo que perder. Las instalaciones que se construyan en esta década bien podrían seguir activas en 2056.

La eficacia en el consumo eléctrico proporciona la manera más clara de ahorrar carbón. De los 14.000 millones de toneladas de emisiones de carbono previstas para 2056, quizá 6000 millones provengan de la producción de energía, sobre todo a partir del carbón. Los edificios residenciales y comerciales, que hoy generan el 60 por ciento de la demanda mundial de electricidad (el 70 por ciento en EE.UU.), consumirán la mayor parte de la nueva energía. Por tanto, si se redujera a la mitad el consumo eléctrico de los edificios —con alumbrados y aparatos de muy elevado rendimiento—, se podrían llenar dos cuñas. Otra cuña se lograría si la industria encontrara nuevas formas de utilizar la electricidad con mejor rendimiento.

Descarbonizar la oferta

Aun tras la implantación de técnicas de alto rendimiento energético, se seguirán necesitando centrales de energía. Podrían ser de carbón, pero con un proceso inteligente que capture el CO_2 y lo introduzca en el suelo por bombeo [*véase* "Almacenamiento del dióxido de carbono bajo tierra", por Robert H. Socolow; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2005]. Los elevados precios actuales del crudo rebajan el coste de la transición a este método, ya que el CO_2 capturado se podría vender a una compañía petrolera, que lo inyectaría en los pozos para extraer más crudo; así, cuanto más alto sea el precio del crudo, mayor será el valor del CO_2 capturado.

Para llenar una cuña, habría que equipar 800 grandes centrales de carbón con medios para capturar y almacenar todo el CO_2 que de otro modo lanzarían al aire. Gracias a esta captura y almacenamiento, la restricción de las emisiones de carbono no sería óbice para la extracción de carbón destinado a la producción de energía.

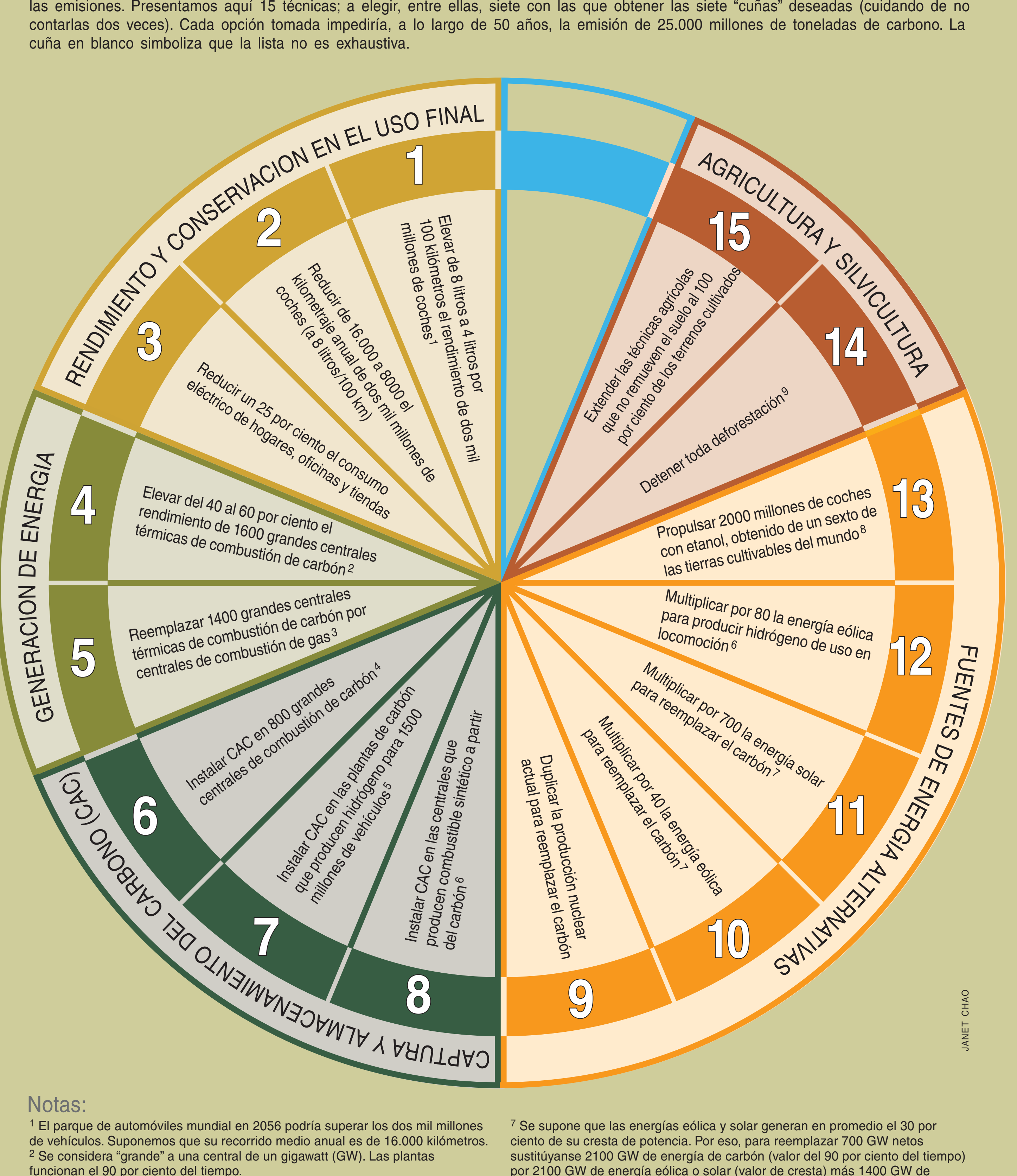
Las centrales grandes de gas natural que funcionen en 2056 podrán asimismo capturar y almacenar el CO_2 que emitan, con lo que tal vez se llenaría otra cuña. Hay que sumar, además, las aportaciones de las energías renovables y de la energía nuclear. Se puede producir energía eléctrica renovable directamente del Sol, sea por excitación de células fotovoltaicas o por medio de espejos que concentren los rayos para calentar un fluido y mover una turbina; hay también un camino indirecto, el aprovechamiento de la fuerza del agua y del viento, dependiente de patrones climáticos gobernados por el Sol.

El carácter intermitente de la energía renovable no merma su capacidad de llenar cuñas. La energía supletoria provendría de plantas de carbón y de gas natural, pero sólo habría que recurrir a ellas parte del tiempo (junto con la energía almacenada); producirían menos carbono que si trabajasen todo el año. Aunque no sea renovable en sentido estricto, se suele considerar también como tal a la energía geotérmica, el calor extraído del interior de la Tierra. Cualquiera de estas fuentes, potenciando su contribución actual, rellenaría una cuña. Debemos cuidarnos de no contar dos veces una posibilidad; una central térmica sólo puede dejar de construirse una vez.

La energía nuclear es acaso la más controvertida de todas las estrategias. Si el número de plantas nucleares se quintuplicara en 2056 y las nuevas centrales ocuparan el lugar de plantas de carbón sin enterramiento del dióxido de carbono, se cubrirían dos cuñas enteras. Si los reactores nucleares actuales se cerraran y se los sustituyera con centrales térmicas modernas aunque sin captura y alma-

QUINCE MANERAS DE LLENAR UNA CUÑA

Con una estrategia general de gestión del carbono, se podrían conseguir durante el medio siglo venidero siete "cuñas" de reducción de las emisiones. Presentamos aquí 15 técnicas; a elegir, entre ellas, siete con las que obtener las siete "cuñas" deseadas (cuidando de no contarlas dos veces). Cada opción tomada impediría, a lo largo de 50 años, la emisión de 25.000 millones de toneladas de carbono. La cuña en blanco simboliza que la lista no es exhaustiva.



Notas:

1 El parque de automóviles mundial en 2056 podría superar los dos mil millones de vehículos. Suponemos que su recorrido medio anual es de 16.000 kilómetros.
2 Se considera "grande" a una central de un gigawatt (GW). Las plantas funcionan el 90 por ciento del tiempo.
3 Aquí y en lo sucesivo, se supone que las plantas funcionan al 50 por ciento de rendimiento durante el 90 por ciento del tiempo. La producción actual de energía del carbón equivale a 800 de esas plantas.
4 Se supone una captura del 90 por ciento del CO_2.
5 Se supone que un coche (16.000 kilómetros/año, 4 litros/100 kilómetros) requiere 170 kilogramos de hidrógeno al año.
6 Se suponen 30 millones de barriles de combustible sintético al día, la tercera parte de la producción total de petróleo. Se captura la mitad del carbono que originalmente tiene el carbón.
7 Se supone que las energías eólica y solar generan en promedio el 30 por ciento de su cresta de potencia. Por eso, para reemplazar 700 GW netos sustitúyanse 2100 GW de energía de carbón (valor del 90 por ciento del tiempo) por 2100 GW de energía eólica o solar (valor de cresta) más 1400 GW de energía de carbón para sincronizar la producción con la demanda.
8 Se suponen coches de 4 litros/100 kilómetros y 16.000 kilómetros/año, una producción de 15 toneladas por hectárea de biomasa y un uso despreciable de combustibles fósiles. 1500 millones de hectáreas de tierra cultivada en el mundo.
9 Las emisiones de carbono debidas a la deforestación rondan las dos mil millones de toneladas/año. Se supone que hacia 2056 caerán a la mitad, si las cosas siguen el mismo curso que ahora, y a cero si se atienen a la trayectoria plana.

cenamiento de carbono, el resultado sería la *pérdida* de media cuña.

La expansión o restricción del número de plantas nucleares dependerá de que funcionen sin accidentes y se encuentren soluciones políticas para el tratamiento de los residuos. (Las centrales nucleares son rehenes unas de otras: la peor explotada del mundo amenaza el futuro de las demás.) También son indispensables unas normas estrictas que impidan que las técnicas nucleares de uso civil sirvan para la producción de armas nucleares. Esas reglas habrán de compartirlas todos los países para que no se perciba un doble rasero, acicate para la construcción de instalaciones clandestinas.

En 2002, el 43 por ciento de las emisiones globales de CO_2 procedía del petróleo y el 37 por ciento del carbón; el resto lo ponía el gas natural. Más de la mitad del petróleo se utilizaba en locomoción. En consecuencia, por mucho que se la perfeccione, la producción de electricidad no podrá por sí sola llenar el triángulo de estabilización: habrá además que reducir carbono en el transporte. Como sucede con la electricidad generada por centrales de carbón, puede llenarse al menos una cuña con cada una de las tres opciones complementarias: la reducción del uso, la mejora del rendimiento y descarbonización de las fuentes de energía.

Merced al teletrabajo, se ahorrarían desplazamientos y se viajaría por placer en vehículos que consumirían con alto rendimiento un combustible escaso en carbono. El combustible podría provenir de residuos vegetales o cultivos específicos, de hidrógeno generado con energía eléctrica de bajo contenido en carbono o incluso de energía eléctrica misma, cargada en las baterías de a bordo. Generan electricidad con bajo contenido en carbono el viento, la energía nuclear o el carbón con captura y almacenamiento de CO_2.

Sobre este horizonte planea una amenaza: las emisiones de carbono del sistema de transporte aumentarían si, por razones de seguridad energética, los combustibles para la locomoción se obtuviesen del carbón y no del petróleo. Los combustibles sintéticos fabricados a partir de carbón (los *synfuels*) reducirían la demanda global de crudo; con ella, bajaría también el precio del petróleo y se aliviaría la dependencia mundial de las reservas de Oriente Medio.

Se trata, empero, de carburantes muy perjudiciales para el clima. Un coche emite con ellos la misma cantidad de CO_2 que con la gasolina; ahora bien, la fabricación del sintético a partir del carbón desprende mucho más carbono que el refino del petróleo crudo para obtener gasolina, duplicándose las emisiones por kilómetro recorrido. Por suerte, resulta posible capturar y almacenar las emisiones de las fábricas de synfuel. Si las tendencias del rumbo presente condujeran a generalizar el uso de estos combustibles sintéticos, la captura de CO_2 en las fábricas que los produjesen podría muy bien rellenar una cuña.

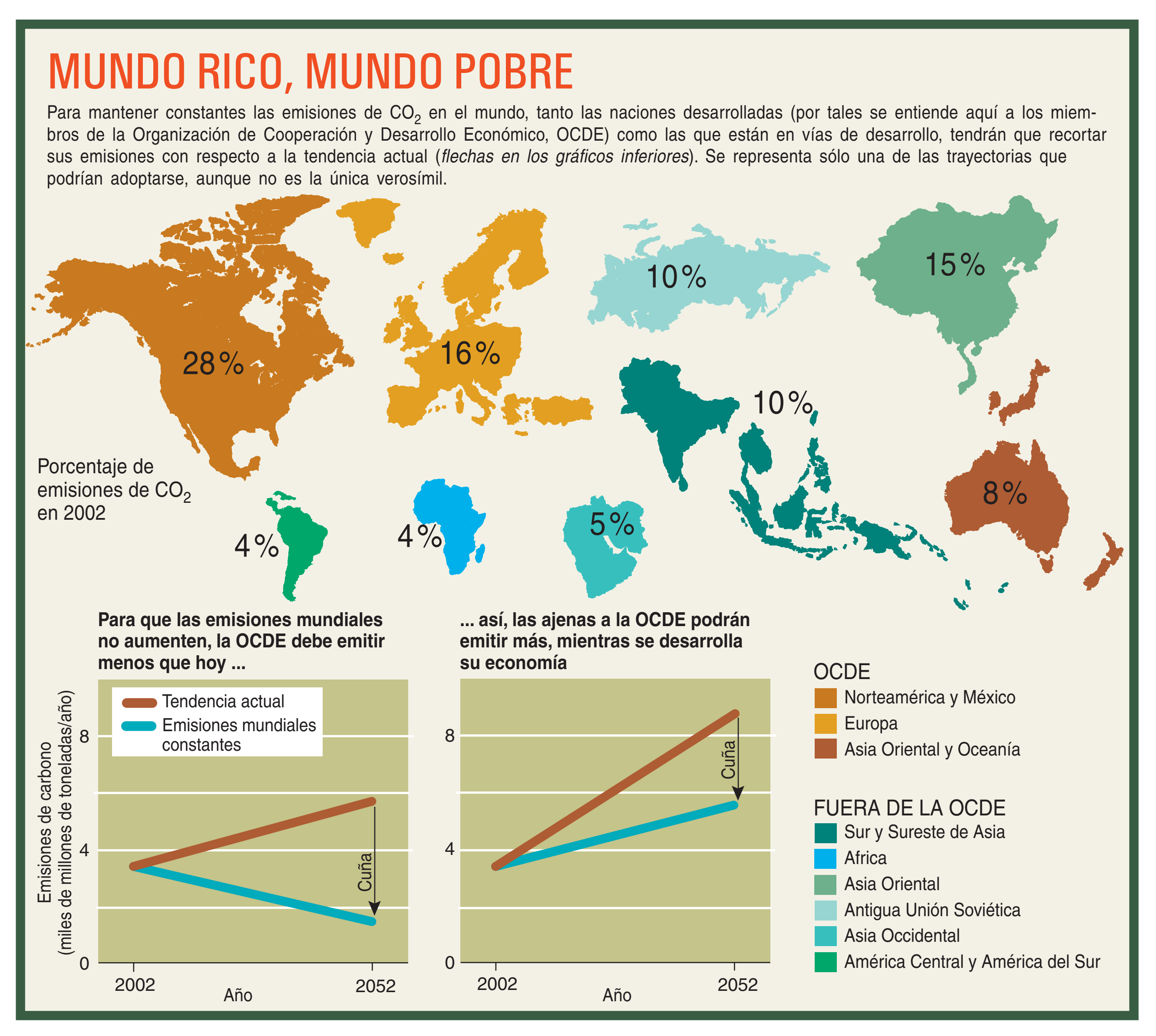
No en todas las cuñas intervienen técnicas nuevas. Se ganaría una con que los campesinos prescindiesen de la arada tradicional, es decir, dejaran de remover la tierra y sólo hendieran. Eliminar la deforestación proporcionaría dos cuñas con respecto al ritmo actual de deforestación. Cercenar las emisiones de metano, cuya contribución al calentamiento por efecto invernadero es casi la mitad de la aportación del CO_2, llenaría más de una cuña, si bien hay que conocer mejor las emisiones biológicas anaeróbicas del ganado, los arrozales y los regadíos. También se cubriría una cuña si se redujese más la natalidad: si se supone que la población mundial sería en 2056, conforme a las tendencias actuales, de nueve mil millones de personas, la reducción adicional debería conducir a que la cifra real no sobrepasase los ocho mil millones.

Plan de acción

¿Qué conjunto de medidas proporcionará las siete cuñas necesarias? Por descontado, los grandes cambios que prevemos en el sistema de combustibles fósiles, con el uso habitual de la captura y almacenamiento de CO_2, exigirán instituciones que impongan, de manera fiable, un precio a las emisiones presentes y futuras. Estimamos que, para que se emprenda la transición, el precio de la tonelada de carbono emitido debería encontrarse entre los 80 y los 160 euros: dentro de este margen, a los propietarios de las centrales de carbón les tendría más cuenta capturar y almacenar el CO_2 que dejarlo escapar. El precio podría bajar a medida que se avanzase en la curva de aprendizaje. En EE.UU., 100 dólares (unos 80 euros) por tonelada de carbono emitido sería un precio equiparable al incentivo fiscal que hoy se concede a las energías renovables y nucleares sustitutivas del carbón, y la mitad de la subvención que promueve la sustitución de la gasolina por el etanol. También ha sido el precio de los derechos de emisión negociables de CO_2 en la Unión Europea durante casi todo un año, entre 2005 y 2006. (Una tonelada de carbono equivale a 3,7 toneladas de CO_2; por tanto, ese precio de 100 dólares equivale a 27 dólares o 22 euros por tonelada de CO_2.) Por su contenido de carbono, 100 dólares por tonelada de carbono equivalen a 12 dólares por barril de crudo y 60 dólares (48 euros) por tonelada de carbón. Dicho de otra forma: 5,30 céntimos de euro por litro de gasolina y 1,6 céntimos por kilowatt-hora de electricidad obtenida del carbón.

Pero quizá no baste con fijar un precio a las emisiones de CO_2. Los gobiernos tendrían que estimular la comercialización de técnicas de baja emisión de carbono para que en el futuro abunden las opciones competitivas, entre ellas la energía eólica, la fotovoltaica y la propulsión híbrida de automóviles. También convendría aplicar medidas disuasorias contra las inversiones a largo plazo en las instalaciones que no se adapten a la política futura. Se ha de inducir a las empresas eléctricas a que inviertan en captura y almacenamiento de CO_2 en sus nuevas centrales de carbón, de muy costosa modificación posterior. Otras medidas deberían aprovechar la capacidad que tienen los productores de energía de potenciar la eficacia en el consumo: incitarían a las empresas eléctricas a que utilizaran aparatos eficientes, a las de gas natural a cuidar los edificios donde se quema el gas que suministran y a las petroleras a preocuparse por los motores que se alimentan con su combustible.

Para que las emisiones se mantengan en los niveles actuales, el ascenso de las emisiones de un tipo debe compensarse con la caída de otra categoría de emisiones. Si aumentan las que proceden del gas



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: "GLOBAL, REGIONAL AND NATIONAL FOSSIL FUEL CO_2 EMISSIONS", POR G. MARLAND, T. A. BODEN Y R. J. ANDRES, EN *TRENDS: A COMPENDIUM OF DATA ON GLOBAL CHANGE*. CENTRO DE ANALISIS DE INFORMACIONES SOBRE EL DIOXIDO DE CARBONO, LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE, 2006

natural, tendrán que disminuir las combinadas del petróleo y del carbón. Una subida de las emisiones del transporte aéreo exigirá un descenso de las producidas en otro sector de la economía. Y para que los países pobres de hoy puedan emitir más carbono, tendrán que emitir menos los ricos ahora.

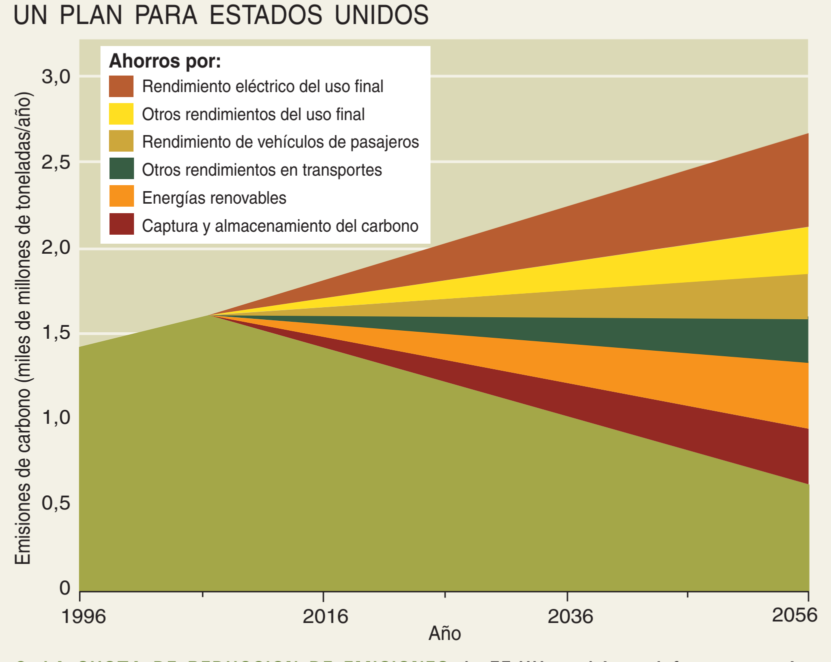
¿Cómo cuantificar la disminución? No es difícil delimitar la respuesta. Las naciones industrializadas —las que componen la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE)— producen la mitad, casi exacta, de las emisiones de CO_2 del planeta; la otra mitad procede de los países en vías de desarrollo y de los de la extinta Unión Soviética. En un mundo de nivel de emisiones constante, parecería imposible justificar que la OCDE siguiese generando la mitad de las emisiones, pese a la irrefrenable demanda de energía en los países ajenos a la OCDE, donde vive el 80 por ciento de la población mundial. Por otro lado, los estados miembros de la OCDE tendrán de todas formas que emitir algo de CO_2 en 2056. Por pura aritmética, para que se mantuviesen constantes las tasas de emisión mundiales, las de los países que no pertenecen a la OCDE ni siquiera podrían duplicarse.

Se obtendría un valor intermedio si las naciones de la OCDE adoptaran el objetivo señalado para el Reino Unido por Tony Blair en 2003: una reducción del 60 por ciento de las emisiones en 2050 con respecto a los niveles recientes. Los demás países podrían entonces emitir un 60 por ciento más de CO_2. Por término medio, en el ecuador del siglo sus emisiones per cápita llegarían a la mitad de las producidas en los países de la OCDE. La generación de CO_2 en cada país, rico o pobre, estaría así muy por debajo del valor predicho en caso de que no se prestase atención al cambio climático. En el caso de los Estados Unidos, serían unas cuatro veces menores.

El objetivo de Blair dejaría el promedio de emisiones de EE.UU. en el doble de la media mundial; ahora la quintuplican. Estados Unidos podría alcanzar esa meta de muchas maneras (*figura 2*). Los demás países seguirían, en su mayoría, las mismas estrategias. De ahí resultaría una especie de "polinización cruzada", que reduciría los costes de cada nación.

Por fortuna, la meta de reducir el carbono no choca con la de suprimir la pobreza más extrema. Las

emisiones de carbono suplementarias que se produjesen al acelerar el suministro de electricidad y de combustible moderno de cocina a los más pobres de la Tierra se compensarían con la exigua quinta parte de una cuña, sacada de reducciones en otro concepto.



2. LA CUOTA DE REDUCCION DE EMISIONES de EE.UU. podría satisfacerse, según este plan del Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, con un mejor aprovechamiento, energías renovables y carbón limpio.

Allende 2056

El triángulo de estabilización se ciñe al primer tramo del futuro; 50 años. Podemos compararlo con una carrera de relevos que tuviese etapas de medio siglo; el primer corredor pasaría el testigo al segundo en 2056. La equidad entre las generaciones requiere que los dos corredores afronten tareas de dificultad muy semejante. Creemos que la misión encomendada al segundo corredor (reducir a la mitad las emisiones entre 2056 y 2106) no sería más laboriosa que la del primero (mantener las emisiones de 2056 en sus niveles actuales), siempre y cuando se invierta, desde ahora hasta 2056, en investigación y desarrollo.

Un vigoroso esfuerzo pondría quizás a punto técnicas revolucionarias que darían a la segunda mitad del siglo el impulso necesario para su tramo de la carrera. Entre ellas se contarían la extracción directa del CO_2 del aire, el almacenamiento de carbono en minerales, la fusión nuclear, la producción química de hidrógeno con calor generado por un reactor nuclear y la fotosíntesis artificial. Cabe suponer que al menos una de estas técnicas llegará a tiempo para ayudar incluso al primer corredor del relevo, aunque, como hemos dicho antes, mejor es no contar con ello.

Si en 2056 hiciéramos un alto, echásemos la vista atrás y comprobásemos que las emisiones de CO_2 no eran superiores a las actuales, ¿qué se habría conseguido? Se habría abordado tanto la producción industrial de energía como su rendimiento en manos de los consumidores, en todos los sectores económicos y en sociedades de cualquier nivel de desarrollo. Se habrían transformado edificios, alumbrados y frigoríficos, coches, camiones y aviones. Habría cambiado hasta la manera de utilizarlos.

El mundo dispondría todavía de un sistema de energía basado en los combustibles fósiles, de un tamaño casi igual al actual, pero equipado con controles modernos y materiales avanzados; resultaría incomparablemente más limpio. Se producirían energía, combustibles y calor de manera integrada; se habría reducido mucho la contaminación del aire y del agua; estaría mucho más extendida la captura y almacenamiento de carbono. Junto al sistema de energía fósil, habría otro de energía no fósil, más o menos del mismo tamaño. La explotación directa o indirecta a gran escala de energías renovables revitalizaría las zonas rurales y recuperaría terrenos degradados.

Si a la energía nuclear le cumpliese un papel importante, tendría que haber un riguroso control internacional que evitase la transferencia de técnicas nucleares de los usos civiles al armamento. El crecimiento económico persistiría: tanto las naciones pobres como las ricas habrían prosperado. Y nuestros descendientes no se verían obligados a gastar muchos recursos, mucho esfuerzo innovador y mucha energía para protegerse de las crecidas del nivel del mar, el calor, los huracanes y la sequía.

Se habría dado un paso fundamental: el nacimiento de una conciencia mundial. La humanidad sabría ya cómo hacer frente a su destino colectivo; sabría compartir el planeta.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: DANIEL A. LASHOF Y DAVID G. HAWKINS *Natural Resources Defense Council*

Los autores

Robert H. Socolow y **Stephen W. Pacala** dirigen la Iniciativa para la Moderación del Carbono, de la Universidad de Princeton, proyecto subvencionado por BP y Ford. Socolow enseña, además, ingeniería mecánica y Pacala, ecología. Socolow está especializado en técnicas de eficiencia energética, gestión mundial del carbono y captura del carbono. Pacala investiga las interacciones entre biosfera, atmósfera e hidrosfera, con especial interés en el ciclo del carbono.

Bibliografía complementaria

STABILIZATION WEDGES: SOLVING THE CLIMATE PROBLEM FOR THE NEXT 50 YEARS WITH CURRENT TECHNOLOGIES. S. Pacala y R. Socolow en *Science*, vol. 305, págs. 968-972; 13 de agosto, 2004.

Combustibles para los transp

Opciones para la reducción del consumo de petróleo y de las emisiones de gases de invernadero en automóviles y camiones ligeros

John B. Heywood

Seamos sinceros y confesémoslo: a la mayoría de quienes vivimos en los países ricos nos agrada nuestro sistema de transporte. Nos permite viajar cuando nos place, de puerta a puerta, solos o acompañados, y con equipaje. Una red invisible de distribución de mercancías lleva nuestros bienes de aquí para allá; constituye uno de los pilares de nuestro estilo de vida. ¿Por qué preocuparse, entonces, del futuro y, en particular, del modo en que la energía que mueve nuestros transportes pueda repercutir en el entorno?

La razón estriba en el tamaño de esos sistemas de transporte y en su crecimiento, al parecer, inexorable. Consumen gasolina y gasóleo (derivados del petróleo) en cantidades inimaginables. Al quemarse, esos combustibles generan, por oxidación del carbono que contienen, el dióxido de carbono que forma un gas de invernadero. Por tanto, la cantidad de dióxido de carbono que liberan a la atmósfera es también inmensa. Los transportes responden del 25 por ciento de las emisiones mundiales de gases de invernadero. Conforme los países en vías de desarrollo se motoricen, el crecimiento de la demanda global de combustible planteará uno de los mayores retos al control de la concentración atmosférica de gases de invernadero. El parque estadounidense de vehículos ligeros (automóviles, camionetas, utilitarios deportivos, furgonetas y camiones ligeros) consume 0,55 billones de litros de gasolina al año, 5 litros de gasolina por persona y día. Si otros países quemaran gasolina al mismo ritmo, el consumo mundial se decuplicaría.

Mirando al futuro, ¿Qué posibilidades tenemos de conseguir transportes más sostenibles, a un costo razonable?

Opciones

Hay varias alternativas que cambiarían de forma notable la situación. Por citar algunas: el desarrollo de nuevas técnicas para los vehículos, el cambio del uso que hacemos de los vehículos, la reducción de las dimensiones de los mismos y el empleo de otros combustibles. Si nos proponemos reducir radicalmente el consumo energético y las emisiones de gas de invernadero, no nos queda otra opción que trabajar en todas esas direcciones.

Para ello debemos tener presentes varios aspectos del sistema de transportes actual. En primer lugar, está del todo adaptado a su contexto principal: el mundo desarrollado. A lo largo de decenios, se ha establecido un equilibrio entre los costos económicos y las necesidades de los usuarios. Segundo, este vasto sistema optimizado depende de una sola fuente de energía: el petróleo. Dispone de técnicas ya desarrolladas —motores de explosión en tierra y motores de reacción (turbinas) para el aire— que combinan el funcionamiento de los vehículos con este combustible líquido de elevado contenido energético. Además, esos vehículos duran muchos años. De ahí que un cambio rápido resulte doblemente dificultoso. La limitación y la posterior reducción de las repercusiones locales y globales de la energía

VOLKSWAGEN

RESUMEN

- El uso masivo, en los transportes, de combustibles derivados del petróleo libera a la atmósfera cantidades inmensas de dióxido de carbono: el 25 por ciento del total mundial.
- El avance de las técnicas incorporadas en los vehículos, la reducción del tamaño de éstos, el desarrollo de combustibles alternativos y el cambio en los hábitos de uso de los vehículos se cuentan entre las medidas para limitar y, por fin, reducir esas emisiones.
- Para lograr ese propósito, deberán acometerse todas esas acciones.



1. CONCEPT, de Volkswagen. Proyectado para dos pasajeros en circuitos urbanos y suburbanos, dotado de un peso de 290 kilogramos, consume del orden de un litro cada cien kilómetros.

ortes del futuro

consumida en transportes tardarán decenios en hacerse patentes.

Las tasas de rendimiento a menudo resultan engañosas. Lo que cuenta es el combustible consumido en la conducción real. Los motores de gasolina de encendido por chispa ofrecen un rendimiento del orden del 20 por ciento en trayectos urbanos y del 35 por ciento en las condiciones óptimas de funcionamiento.

Pero muchos trayectos con el motor y la transmisión fríos, y los añadidos de una temperatura ambiental baja y una conducción agresiva, agravan el consumo de combustible, lo mismo que los tiempos de ralentí y las pérdidas en la transmisión. Esas condiciones de conducción limitan el rendimiento del motor, hasta el punto de que sólo el 10 por ciento de la energía química almacenada en el depósito de combustible impulsa las ruedas. En un vehículo con una eficiencia del 10 por ciento, con el conductor, un pasajero y equipaje —una carga útil de unos 130 o 140 kilogramos, alrededor del 10 por ciento del peso del vehículo— sólo el 1 por ciento de la energía del combustible contenido en el depósito mueve la carga útil.

En el cómputo deben incluirse también los costes de producción y distribución del combustible, lo que gasta el auto en una vida media de 250.000 kilómetros y los costes de fabricación, distribución y posterior destrucción del vehículo. Esas tres fases del funcionamiento del automóvil suelen conocerse como "del pozo al depósito" (fase responsable del 15 por ciento del consumo energético total durante la vida del vehículo y de las emisiones de gases de invernadero), "del depósito a las ruedas" (75 por ciento) y "de la cuna a la tumba" (10 por ciento). La energía que requieren la producción del combustible y la fabricación del vehículo tampoco es despreciable. Esa visión global del ciclo de vida cobra especial importancia al considerar combustibles no procedentes del petróleo y nuevas técnicas para vehículos. Lo que cuenta es lo que se gasta y se emite en ese *sentido completo*.

Los propios vehículos ligeros encierran un gran potencial. Mediante el aumento del rendimiento del motor y la transmisión, la disminución del peso, la mejora de los neumáticos y la reducción de la resistencia del aire, el consumo se rebajaría en un tercio durante los próximos 20 años; una mejora anual media de entre el 1 y el 2 por ciento. (Tamaña reducción costaría entre 500 y 1000 dólares por vehículo; con el precio futuro del combustible, esa cantidad no aumentaría el costo total de mantenimiento y uso de un vehículo.) Se ha ido avanzando en mejoras de ese jaez en el curso de los últimos 25 años. Pero seguimos comprando coches y vehículos ligeros de mayores dimensiones, más pesados y más rápidos, de modo que los beneficios que habríamos conseguido los hemos cambiado por esas otras prestaciones.

Aunque más patente en EE.UU., la tendencia hacia los vehículos de mayor tamaño y potencia se ha registrado también en otros lugares. Debemos hallar el modo de motivar a los consumidores para que hagan uso de su facultad y así incidir en la reducción del consumo de combustible y las emisiones de gases de invernadero.

A corto plazo, si se reducen el peso y el tamaño de los vehículos, y consumidores y fabricantes abandonan

CONSUMO MUNDIAL DIARIO DE PETROLEO

Hoy se gastan 80 millones de barriles de petróleo al día (MBD). Un barril contiene 159 litros. Los dos tercios del total los consume el transporte.

53	29	19	5
MBD para el total de los transportes	MBD para el transporte terrestre de personas	MBD para el transporte terrestre de mercancías	MBD para el transporte aéreo de personas y mercancías

la siempre ascendente senda potencia/prestaciones, podremos, en el mundo desarrollado, frenar el ritmo de la demanda de petróleo, estabilizarla en unos 15 o 20 años en torno al 20 por ciento por encima de la demanda actual e iniciar un lento camino descendente. Este pronóstico puede parecer insuficiente. Con todo, resulta estimulante y modifica nuestra actitud pasiva ante un consumo de petróleo que crece en torno al 2 por ciento anual.

A largo plazo, existen otras opciones: combustibles alternativos que remplazaran parte del petróleo, nuevos sistemas de propulsión mediante hidrógeno o electricidad. Ir incluso más lejos en el desarrollo y aceptación de vehículos de menor tamaño y peso.

La implantación de los combustibles alternativos habrá de entrañar dificultades, a menos que sean compatibles con los sistemas de distribución actuales. Además, los combustibles ahora en uso son líquidos de gran densidad energética; combustibles de densidad energética menor requerirían depósitos de mayor capacidad o una disminución de la autonomía actual, que se cifra en unos 650 kilómetros.

Desde esta perspectiva, destaca la alternativa que ofrece el petróleo no estándar (arenas petrolíferas o bituminosas, aceites pesados, esquistos bituminosos, hullas). Pero la obtención de "crudos" a partir de esos recursos requiere grandes cantidades de otras formas de energía, como gas natural y electricidad. De ahí que esos procesos emitan cantidades importantes de gases de invernadero y produzcan otros impactos ecológicos. Además, necesitan fuertes inversiones de capital. No obstante, pese al mayor impacto ambiental, la explotación de los yacimientos petrolíferos no estándares ya ha empezado; se espera que antes de los próximos 20 años proporcione alrededor del 10 por ciento del combustible para los transportes.

Ha echado a andar la producción de combustibles extraídos de biomasa (etanol y biodiésel). Se supone que emiten menos dióxido de carbono por unidad de energía. En Brasil, el etanol obtenido de la caña de azúcar constituye alrededor del 20 por ciento del combustible que consumen los transportes. En EE.UU., alrededor del 20 por ciento de la cosecha de maíz se transforma en etanol. Buena parte de éste se mezcla con gasolina, hasta un 10 por ciento, en las gasolinas reformuladas (o de combustión más limpia). La ley estadounidense sobre política energética se propone que, hacia 2012, se haya duplicado la producción de etanol para combustible de transportes desde el 2 por ciento actual. Pero las cantidades de fertilizantes, agua, gas natural y electricidad que se emplean en la producción de etanol de maíz deberán rebajarse sustancialmente.

La producción de etanol a partir de biomasa celulósica (residuos y desperdicios procedentes de plantas que no suelen emplearse como recursos alimenticios) promete mejorar en eficiencia y disminuir las emisiones de gases de invernadero. El proceso no ofrece todavía viabilidad comercial, pero todo llegará. El biodiésel se obtiene de diversos oleocultivos (colza, girasol, soja) y de grasas animales de desecho. Las pequeñas cantidades que se producen se mezclan con combustibles diésel estándar.

Es probable que el uso de combustibles procedentes de biomasa crezca de forma sostenida. No obstante, conviene recordar que la conversión a gran escala de cosechas en combustibles plantea interrogantes sobre su repercusión en la calidad del suelo, las reservas de agua y las emisiones globales de gases de invernadero. Resulta improbable que ese recurso predomine en el abastecimiento de combustible en un futuro inmediato.

El empleo de gas natural en los transportes varía desde menos del uno por ciento hasta del 10 al 15 por ciento; los últimos guarismos corresponden a países donde la política fiscal lo privilegia. En los años noventa logró cierta penetración en las flotas de autobuses de los municipios estadounidenses como medio para rebajar las emisiones contaminantes; en la actualidad, sin embargo, los motores diésel con purificador de escape constituyen opciones más baratas.

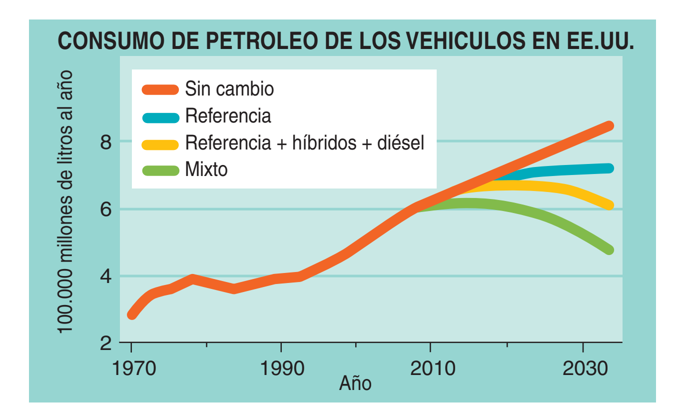
¿Qué decir de las nuevas técnicas de propulsión? Las novedades más prometedoras incluirían motores de gasolina mejorados (con un turboalimentador e inyección de combustible directa, por ejemplo), transmisiones más eficientes y vehículos diésel con catalizadores, colectores de partículas en el escape y quizá nuevos métodos en los procesos de quema del combustible. Los híbridos, que combinan un motor pequeño de gasolina y un motor eléctrico alimentado por batería, están ya circulando; aumenta el volumen de su producción. Se trata de vehícu-

CALENDARIO PARA LAS TECNICAS DE NUEVO CUÑO

Los nuevos diseños automovilísticos podrían reducir el consumo total de energía para transportes. Pero la solución no sería rápida. Estimaciones del Laboratorio de Energía y Medio Ambiente del Instituto de Tecnología de Massachusetts indican cuánto tardarían esas técnicas de nuevo cuño en hacerse notar.

	FASE DE IMPLANTACION			
TECNICA	**Vehículo comercialmente competitivo**	**Penetración en la producción de vehículos nuevos ***	**Penetración notable en las flotas †**	**Tiempo total para la repercusión**
Motor de gasolina turboalimentado	5 años	10 años	10 años	20 años
Diésel de baja emisión	5 años	15 años	10-15 años	30 años
Híbrido de gasolina	5 años	20 años	10-15 años	35 años
Híbrido de pila de hidrógeno	15 años	25 años	20 años	55 años

** Más de un tercio de la producción de vehículos nuevos* *† Más de un tercio del kilometraje recorrido*



2. EXTRAPOLACION DEL CONSUMO DE PETROLEO para el próximo cuarto de siglo bajo cuatro supuestos. "Sin cambio": se supone que el consumo por vehículo se mantiene constante a partir de 2008. "Referencia": se añaden las mejoras derivadas del desarrollo de la técnica. "Referencia + híbridos + diésel": se da por cierta la entrada gradual en servicio de vehículos diésel e híbridos gasolina-eléctricos. "Mixto": se añade a la combinación anterior una ralentización de la venta de vehículos y de las distancias recorridas.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: LABORATORIO DE ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE DEL MIT

los que consumen menos gasolina en conducción urbana, resultan menos económicos en autopista a velocidades de carretera y su precio de venta es algo superior.

Los expertos están trabajando en combustibles y sistemas de propulsión de nuevo cuño. En particular, se centran en los que reducen las emisiones de dióxido de carbono. Varias organizaciones están desarrollando vehículos de pila de combustible de hidrógeno en versión híbrida con batería y motor eléctrico. Esos sistemas duplicarían el rendimiento de los vehículos, pero esa ventaja la anularía en parte la energía consumida y las emisiones generadas en la producción y distribución del hidrógeno. Si éste se produjera mediante procesos que emiten poco carbono y se organizara un sistema de distribución factible, su potencial respecto a la reducción de gases de invernadero sería indiscutible. Pero se requerirían grandes avances técnicos y muchos lustros para que los transportes basados en el hidrógeno fuesen una realidad y sus efectos se notaran a gran escala.

Más que una fuente de energía, el hidrógeno constituye un vector de energía. La electricidad corresponde también a un vector de energía alternativo que podría generar energía sin liberar dióxido de carbono. Varios equipos de investigación están ya considerando esta posibilidad con vistas a emplearla en los transportes.

La mayor dificultad reside en el desarrollo de una batería que aporte la autonomía suficiente a un coste aceptable. Un inconveniente técnico es el largo tiempo de recarga. Quienes estamos acostumbrados a llenar en cuatro minutos un tanque de 75 litros, podríamos tener que esperar varias horas para recargar una batería. El híbrido enchufable ofrece una solución a este problema, merced a un pequeño motor de explosión que lleva a bordo para recargar la batería cuando hace falta. Así, la energía consumida sería mayormente eléctrica y térmica sólo en parte. No sabemos todavía si el mercado acogerá bien la técnica del híbrido enchufable.

Además de adoptar sistemas de propulsión mejorados, podríamos reducir el peso y mejorar el consumo, sin sacrificar las dimensiones, mediante el uso de materiales más ligeros y la modificación de la estructura de los vehículos. Obviamente, la combinación de unas dimensiones menores con unos materiales más ligeros produciría un efecto aún mayor. En el futuro, la función del vehículo podría diferir radicalmente de la que cumple ahora el "vehículo de uso general". En el futuro, lo lógico será pensar en un vehículo diseñado específicamente para la conducción urbana. Volkswagen, por ejemplo, ha desarrollado un prototipo biplaza que pesa 290 kilogramos y consume un litro de gasolina cada 100 kilómetros; en EE.UU., los vehículos de servicio ligero gastan del orden de 10 litros cada 100 kilómetros. Hay quien aduce que la reducción de tamaño recorta también la seguridad, pero este efecto puede minimizarse.

Promoción del cambio

Técnicas más refinadas potenciarán, sin duda, el rendimiento del combustible. Los mercados del mundo desarrollado quizás adopten de entre las enumeradas las mejoras que basten para compensar el esperado aumento del número de vehículos. A buen seguro, los precios de la gasolina seguirán subiendo en los próximos quinquenios. Con ello se forzará el cambio de la función que los consumidores otorguen a los vehículos. Pero es poco probable que las fuerzas del mercado solas logren contener nuestro incesante apetito de petróleo.

Para que esas mejoras futuras se traduzcan en una reducción del consumo de combustible hay que poner en juego un paquete de políticas fiscales y normativas. Entre las medidas eficaces habría que incluir un plan de "incentivos", en el que los compradores pagarían una tasa extra por la compra de un vehículo de gran consumo, pero se les aplicaría un descuento si compran modelos de menor tamaño y mayor eficiencia energética. Esos incentivos encajan con las normas sobre "Media Empresarial de Ahorro de Combustible", que exigen a los fabricantes de automóviles que sus productos consuman menos combustible. Si al paquete se añade un aumento en los impuestos sobre los combustibles, ello orientaría más aún a los compradores hacia los modelos que consumen menos. Los incentivos fiscales catalizarían así en los centros de producción el cambio hacia las nuevas técnicas. Quizás haya que aplicar todas esas medidas para seguir adelante.

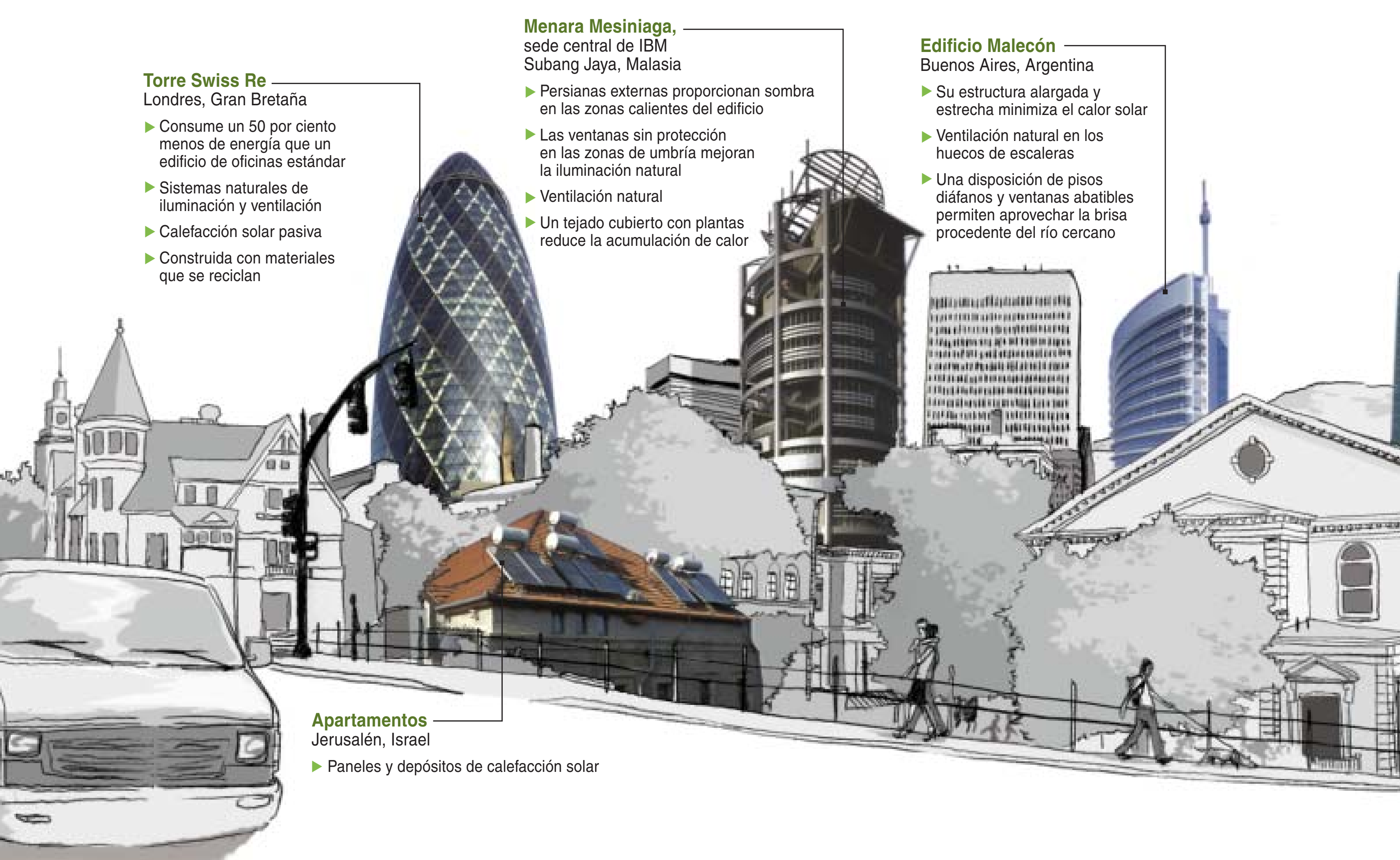
El autor

John B. Heywood ocupa la cátedra Sun Jae de ingeniería mecánica y dirige el Laboratorio de Automoción Sloan en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Bibliografía complementaria

REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM U.S. TRANSPORTATION. David L. Green y Andreas Schafer. Pew Center on Global Climate Change, mayo, 2003.

MOBILITY 2030: MEETING THE CHALLENGE TO SUSTAINABILITY. Consejo Financiero Mundial para el Desarrollo Sostenible, 2004.



Aumento del

RESUMEN

■ Dos tercios de la energía que se produce se pierden durante su conversión para utilizarla en actividades humanas. La mayor parte de esa energía procede de combustibles fósiles que emiten carbono.

■ La forma más rápida y fácil de reducir las emisiones de carbono consiste en evitar fugas de energía.

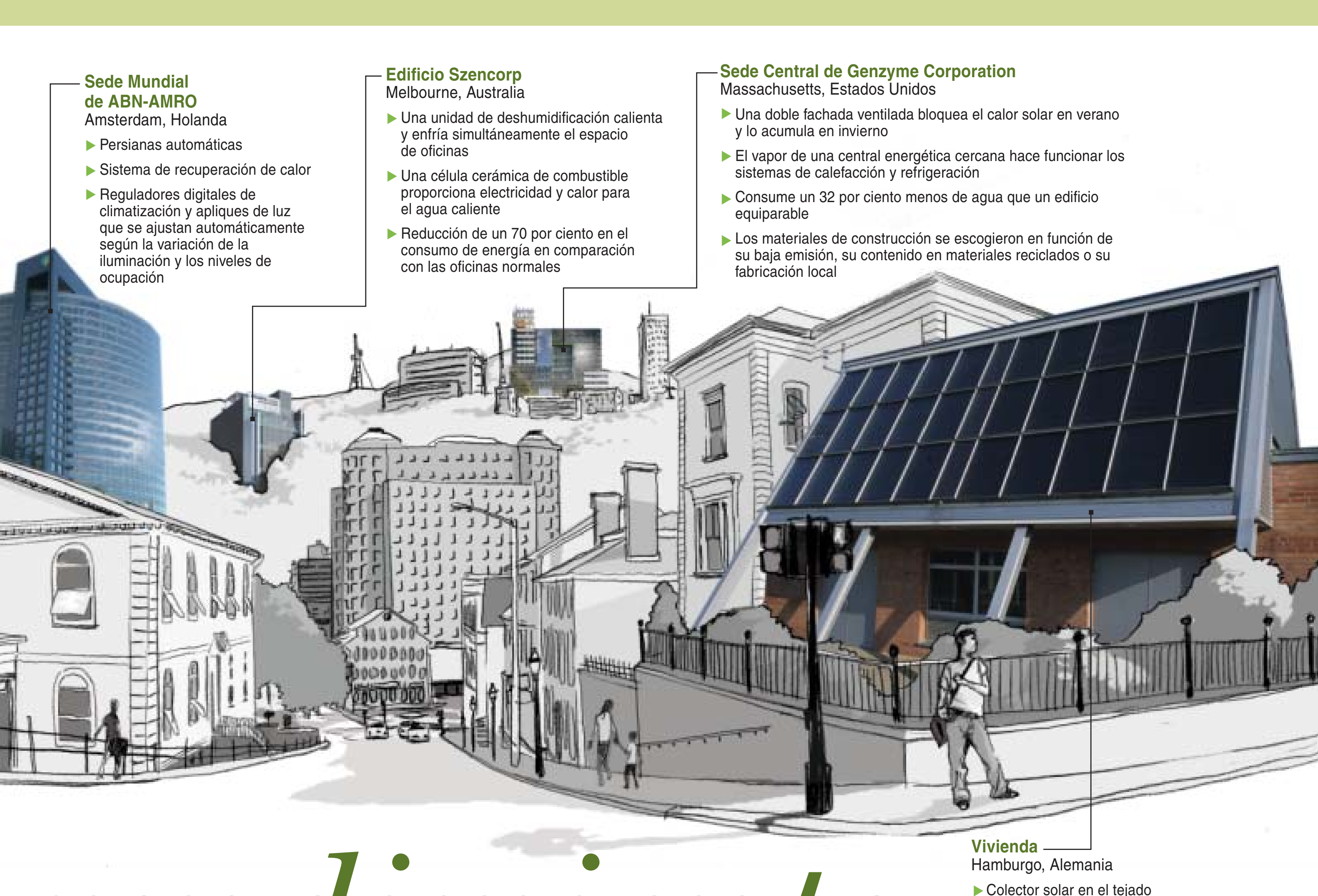
■ La mejora de la eficiencia energética de edificios, electrodomésticos y procesos industriales reporta un ahorro sustantivo.

El potencial de las medidas de eficiencia energética para mitigar la emisión de gases de invernadero resulta poco atractivo cuando se compara con opciones alternativas atrayentes: las energías renovables, la nuclear o la basada en el hidrógeno. No obstante, desarrollar una estrategia integral de aprovechamiento energético es lo más rápido y barato que podemos hacer para reducir las emisiones de carbono. Constituye una medida rentable y eficaz, como demuestran dos ejemplos recientes.

De 2001 a 2005, la fábrica de Procter & Gamble en Alemania aumentó su producción en un 45 por ciento, pero sólo creció en un 12 por ciento la energía necesaria para hacer funcionar la maquinaria y para la calefacción, refrigeración y ventilación de los edificios. Hubo más. Las emisiones de carbono permanecieron en el nivel de 2001. Este éxito se basó en un sistema eficaz de iluminación, sistemas de aire comprimido, nuevos diseños para la calefacción y el aire acondicionado, canalización de pérdidas de calor desde los compresores hacia la calefacción de los edificios y, por fin, seguimiento estricto de las mediciones de energía y de la facturación.

En unos 4000 hogares y edificios en Alemania, Suiza y Escandinavia, un aislamiento extenso, ventanas herméticas y un diseño acorde con las necesidades energéticas han potenciado el aprovechamiento energético. El presupuesto para calefacción alcanza sólo un sexto de lo acostumbrado en los edificios de esos países.

La mejora del rendimiento energético se consigue a través de la cadena entera, desde la conversión de energía primaria (por ejemplo, el



rendimiento y ahorro *energético*

El control de las fugas energéticas constituye la forma más rápida y económica de detener las emisiones de carbono

Eberhard K. Jochem

petróleo) hasta los vectores energéticos (la electricidad), llegando por fin a la energía útil (el calor que produce una tostadora). La demanda anual global de energía primaria es de 447.000 petajoule (un petajoule corresponde a unos 300 gigawatt/hora), cuyo 80 por ciento procede de combustibles fósiles que emiten carbono (petróleo, carbón y gas). Tras la conversión, estas fuentes primarias proporcionan unos 300.000 petajoule de la energía final para consumo en forma de electricidad, gasolina, gasóleo de calefacción, combustible de aviación y otros.

El paso siguiente —conversión de la electricidad, la gasolina y similares en energía útil para motores, calderas y bombillas— genera pérdidas adicionales de energía estimadas en 154.000 petajoule. Por tanto, casi 300.000 petajoule, o dos tercios de la energía primaria, se pierden durante las dos etapas de conversión energética. Además, toda la energía útil se disipa finalmente en forma de calor a distintas temperaturas. Un aislamiento hermético de los edificios, un cambio en los procesos industriales y una fabricación de vehículos más ligeros y aerodinámicos reducirían la demanda de energía útil, con el recorte subsecuente del despilfarro de energía.

Ante la amenaza que supone el cambio climático y los importantes aumentos que se esperan en los precios de la energía, las pérdidas producidas a lo largo de la cadena energética ofrecen una oportunidad para optimizar el rendimiento del proceso y mejorar la situación. Nuevas técnicas y conocimientos deben ayudar a cambiar el actual consumo intensivo de energía y materias primas.

Espacio para la mejora

Puesto que las medidas ambientalistas, incorporadas en los futuros automóviles o en un nuevo tipo de central energética, ejercen un efecto decisivo en el consumo de energía, repercuten en las emisiones totales de carbono. Los edificios y las casas, derrochadores de energía en muchos países todavía, constituyen un objetivo central de las políticas de ahorro. En los estados miembro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y en las grandes ciudades de los países emergentes, los edificios contribuyen en más de un tercio al total de emisiones de gases de invernadero relacionadas con la energía.

Se han llevado a cabo avances importantes, aunque poco divulgados: en general, mejoras del rendimiento energético imperceptibles por el consumidor. A partir de la crisis energética del decenio de los setenta, los acondicionadores de aire en EE.UU. se rediseñaron para que consumiesen menos energía sin merma de capacidad de enfriamiento. Las nuevas normas de edificación estadounidenses exigieron ventanas de doble hoja y un mayor aislamiento. Los nuevos frigoríficos consumen sólo un cuarto de la potencia de los modelos antiguos. (Con unos 150 millones de frigoríficos y congeladores en los EE.UU., la diferencia en consumo entre los niveles de rendimiento de 1974 y 2001 equivale a una rebaja de 40 gigawatt en la producción de las centrales energéticas.) El cambio a bombillas fluorescentes compactas ofrece una reducción instantánea en la demanda energética; proporcionan tanta luz como las bombillas incandescentes normales, duran diez veces más y consumen sólo de un cuarto a un quinto de su energía.

No obstante tales progresos, quedan por dar pasos cruciales. Muchos edificios se diseñaron en su momento con la intención de minimizar los costes de construcción, sin prestar atención a la economía de mantenimiento durante su vida efectiva, incluido el consumo energético. Pensemos en los aleros de los tejados, que en climas cálidos solían medir alrededor de un metro; en la actualidad se emplean sólo en raras ocasiones, debido a su coste adicional, aunque controlarían la acumulación de calor en paredes y ventanas. Uno de los mayores fabricantes europeos de casas prefabricadas ofrece ahora viviendas con un coste energético neto nulo: bien aisladas e inteligentemente diseñadas con colectores fotovoltaicos y termosolares, estas estructuras no necesitan energía comercial; su coste total es similar al de viviendas nuevas construidas según las normas de edificación. Como los edificios tienen una vida de 50 a 100 años, las remodelaciones para la mejora del rendimiento energético resultan esenciales. No obstante, los cambios en los edificios ya existentes deben coordinarse con sumo cuidado para evitar que se produzca la sustitución de un componente, la caldera por ejemplo, mientras permanecen intactas conducciones no estancas y ventanas de una hoja, que derrocharían gran parte del calor producido por la nueva caldera.

Citemos un ejemplo por botón de muestra: aunque algunos fabricantes de alfombras tiñen todavía sus productos a temperaturas de 100 a 140 ºC, otros lo hacen a temperatura ambiente mediante la acción de enzimas, lo que reduce la demanda energética en más de un 90 %.

La importancia de una política energética

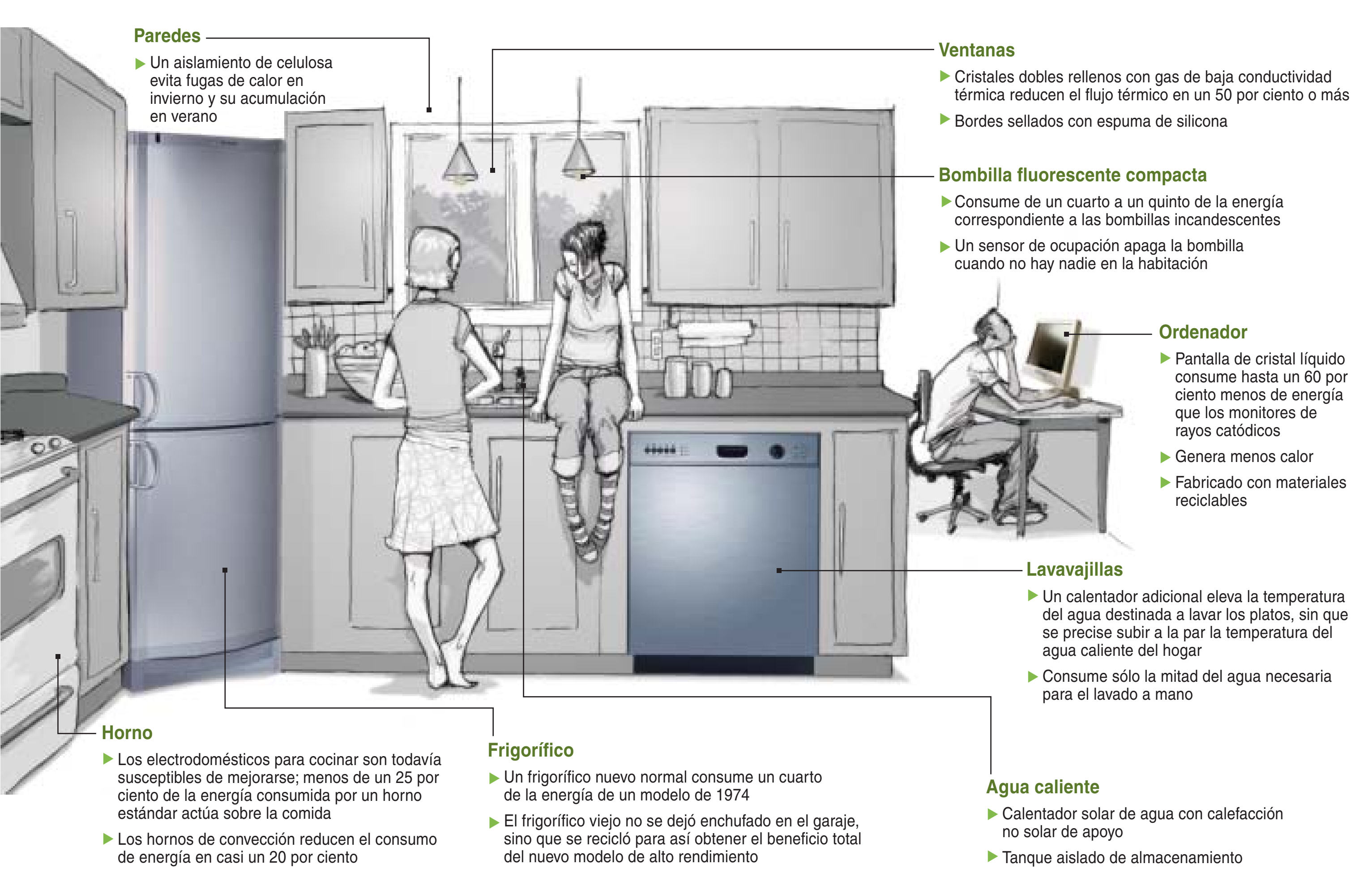
Para extraer el máximo partido de esa mayor eficiencia energética, resulta esencial la aplicación de medidas políticas tajantes. Ni fabricantes ni el público suelen estar bien enterados sobre las opciones de aprovechamiento energético o sobre métodos presupuestarios idóneos, para evitar los que no toman en consideración los beneficios de las inversiones a largo plazo ni las imperfecciones del mercado (verbigracia, los costes externos para las emisiones de carbono y otros costes del consumo de energía).

La política energética de los gobiernos se ha caracterizado por subestimar los beneficios de un incremento en el ahorro. Hay, sin duda, factores ajenos a la política que estimulan cambios en el rendimiento energético: aumento de los precios de la energía, técnicas de nuevo cuño o competición de costes. No obstante, las medidas políticas (impuestos energéticos, incentivos económicos, formación profesional, etiquetado, legislación ambiental, comercio con las emisiones de gases de invernadero y coordinación internacional de normas para productos manufacturados) marcan una gran diferencia.

Además, el rápido crecimiento de la demanda en los países emergentes ofrece una oportunidad para la aplicación de políticas energéticas eficientes desde la raíz, conforme se van consolidando las infraestructuras: programas para el desarrollo de soluciones energéticas en edificios, transportes e industrias proporcionarían a la población el servicio energético necesario sin tener que construir tantas centrales de energía, refinerías o gasoductos.

Japón y los países de la Unión Europea se han aprestado a reducir las importaciones de petróleo. Y lo han hecho

PAGINAS ANTERIORES: MATT VINCENT ILLUSTRATION; JOEY NIGH *Corbis* (*Londres*); LIOR RUBIN *Peter Arnold, Inc.* (*Jerusalén*); K. L. NG (*Malasia*); DANIELA MAC ADDEN (*Buenos Aires*); ABN-AMRO (*Amsterdam*); SZENCORP (*Melbourne*); GENZYME (*Cambridge, Mass.*); JOERG BOETHLING *Peter Arnold, Inc.* (*Hamburgo*)



MATT VINCENT ILLUSTRATION; THE GREEN CULTURE/SOLARGOODS.COM (*frigorífico y lavavajillas*); NEC CORPORATION OF AMERICA (*ordenador*); LUCY READING-IKKANDA (*bombillas*)

con mayor resolución que los EE.UU. Por ejemplo, han estimulado las ganancias en productividad a través de impuestos energéticos y otras medidas.

Donde todos los países de la OCDE, salvo Japón, han fracasado hasta la fecha ha sido en la actualización de los electrodomésticos. En los países de la OCDE, las facturas de gas y electricidad no desglosan la cantidad de energía que se consume en calefacción, en la cocina o en el termo. Tampoco se indican los usos más intensivos de la energía, es decir, aquellos cuya reducción produciría un mayor ahorro. Ni siquiera en la industria suele facturarse por sectores de producción el consumo en aire comprimido, calefacción, refrigeración y electricidad. A menudo se anotan en la partida de gastos generales.

La eficiencia energética presenta un mayor relieve en Europa, Corea y Japón. Un proyecto de remodelación en la alemana Ludwigshafen sirve de muestra. En 2001, 500 viviendas se equiparon para acogerse a las normas de baja energía (30 kilowatt/hora por metro cuadrado por año); la demanda anual de energía para calefacción de estos edificios se redujo en un factor de seis. Antes de la remodelación, estas viviendas eran difíciles de alquilar; en la actualidad, la demanda triplica la oferta.

Existen otros proyectos similares. El Consejo de Institutos Suizos de Tecnología ha sugerido un programa técnico que se propone alcanzar la "Sociedad de los 2000 watt": un consumo anual de energía primaria de 2000 watt (o 65 gigajoule) per cápita. Generalizándose ese enfoque en los países industriales, se reduciría el consumo energético per cápita y las emisiones de carbono relacionadas en dos tercios, a pesar de un aumento de dos tercios del PIB, dentro de los próximos 60 a 80 años. Los expertos suizos (entre ellos el autor del artículo) vienen evaluando este plan desde 2002. Según sus conclusiones, desde el punto de vista técnico los países industriales podrían alcanzar la meta de la "sociedad de 2000 watt" per cápita en la segunda mitad de este siglo.

Algunos asocian la expresión "eficiencia energética" con una reducción del confort. Falso. El concepto significa que se obtiene el mismo servicio —una habitación confortable o un viaje cómodo desde casa al trabajo— con un consumo menor de energía. Los estados de la Unión Europea y Japón han comenzado a aprovechar el potencial de las medidas de eficiencia energética. Para evitar el aumento de costes de las fuentes de energía y las adaptaciones incluso más costosas al cambio climático, el ahorro energético debe convertirse en una actividad global.

El autor

Eberhard K. Jochem enseña economía en el Instituto Politécnico Federal Suizo en Zúrich, donde dirige el Centro para Política y Economía Energéticas. Estudió ingeniería química y economía en Aquisgrán y Múnich.

Bibliografía complementaria

STEPS TOWARDS A SUSTAINABLE DEVELOPMENT: A WHITE BOOK FOR R&D OF ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES. Dirigido por Eberhard Jochem. CEPE and Novatlantis, marzo 2004.

EXPERIENCE WITH ENERGY EFFICIENCY POLICIES AND PROGRAMMES IN IEA COUNTRIES. Howard Geller y Sophie Attali. International Energy Agency, 2005.

Microscopía multifotónica

Sus ventajas

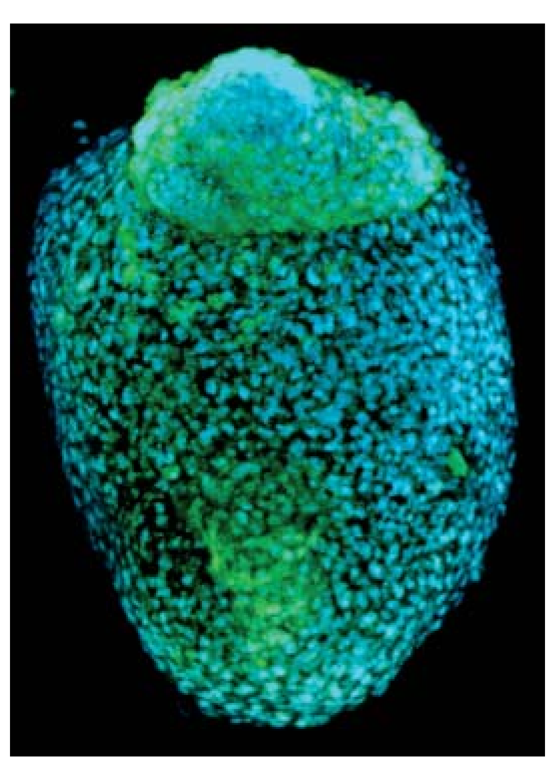
La microscopía de fluorescencia se basa en la capacidad que tienen algunas moléculas, denominadas fluorocromos, de emitir luz mientras las excitan —es decir, cuando absorben— fotones de una determinada longitud de onda. La luz emitida es siempre de menor energía que la de excitación. La longitud de onda de la luz es inversamente proporcional a la energía.

El prototipo de fluorocromo es la fluoresceína. Estimulada con luz azul, que absorbe en el rango de 488-495 nanómetros de longitud de onda, emite luz verde. (Su máximo de emisión se alcanza a los 520 nm). Existen cientos de moléculas fluorescentes que pueden emplearse en microscopía. Muchas de ellas están presentes fisiológicamente en células y tejidos; pensemos en las flavinas o la elastina.

La microscopía multifotónica se ha desarrollado a partir de la microscopía de fluorescencia, técnica que recibe la luz que emiten los fluorocromos una vez excitados. La microscopía multifotónica nos permite obtener secciones ópticas de una muestra gruesa —como si fuesen "rebanadas" de la muestra, por así decirlo— de modo equivalente a como lo hace la microscopía confocal.

En la microscopía confocal se ilumina toda la muestra y se toma únicamente la luz del plano focal utilizando un diafragma que bloquea la llegada de luz procedente de los planos superiores o inferiores al plano focal y se toman diversos planos focales mediante modificación de la altura del microscopio. Luego, en un ordenador se combinan las imágenes de los distintos planos para crear una imagen tridimensional.

La microscopía multifotónica se basa en la estimulación de un fluorocromo, de modo simultáneo por dos o más fotones, exclusivamente en el plano focal. Cuando los dos fotones llegan a la vez, se suman las energías que comunican a la molécula sobre la que inciden. Ello significa que, entre los dos fotones, estimulan la molécula como lo haría uno solo de ellos con el doble de energía que cada fotón por separado. (Recuérdese que a menor energía, mayor longitud de onda.)



Este cuerpo embrionario está formado por la diferenciación *in vitro* de células madre de ratón. Se trata de una estructura multicelular hueca, de unas 500 micrometros de espesor; las células que se han diferenciado convirtiéndose en vasos sanguíneos (endotelio) están marcadas en verde, mientras que los núcleos están teñidos en azul. La imagen es una proyección máxima (una reconstrucción básica de una imagen tridimensional a partir de cortes individuales) de 60 secciones tomadas por un microscopio multifotónico. Ilustra dos de las ventajas de la técnica: trabaja con muestras gruesas y excita fluorocromos del rango ultravioleta con luz infrarroja.

Aunque la teoría es simple, en la práctica la probabilidad de que incidan dos fotones al mismo tiempo y sobre una misma molécula de fluorocromo es bajísima. Sólo pueden formarse estas "parejas de fotones" cuando la densidad fotónica por unidad de superficie es muy elevada. Para conseguirla se recurre a los sistemas de láser pulsados. En ellos, la energía del láser no se aplica de manera continua, sino que los fotones se concentran en pulsos de muy corta duración, aunque de enorme intensidad. Con ello, sobre la muestra incide una verdadera "tromba" de fotones, en la que se crean parejas, o incluso tríos, de fotones.

Existen dos sistemas de estimulación multifotónica. Difieren en virtud de la duración del pulso de fotones. El primer sistema utiliza pulsos de femtosegundos (10^{-15} segundos) y permite que la muestra capture grupos de dos o de tres fotones, de modo que es posible que se estimulen a la vez varios fluorocromos con perfiles de absorción diferentes.

El segundo sistema emplea pulsos de picosegundos, de mayor duración (10^{-12} segundos) y menor intensidad. Se trata de un sistema menos eficiente, que no permite trabajar con más de dos fotones. En ambos sistemas, los láseres más empleados son los sintonizables de titanio-zafiro en el rango del infrarrojo; se les denomina sintonizables porque pueden variar la longitud de onda de emisión.

En el estudio de muestras biológicas, la microscopía multifotónica ofrece varias ventajas sobre la confocal: excitación de la muestra en un punto, posibilidad de excitar fluorocromos, alta capacidad de penetración de los fotones y menores daños en la muestra.

Con respecto a la excitación de la muestra, en la microscopía

multifotónica sólo se producen los pares (o tríos) de fotones en el plano focal. En el resto de la muestra, como, al ser menor la densidad fotónica, no se forman estas parejas, esto implica que no se excitan los fluorocromos y, por tanto, no hay emisión de luz. La tecnología multifotón nos permite conseguir una imagen equivalente a la que obtendríamos con un microscopio confocal, pero sin necesidad de un diafragma que elimine la luz de las zonas fuera de foco: se recoge la totalidad de la luz emitida por la muestra, con el consiguiente aumento de la sensibilidad.

La técnica multifotónica posibilita excitar fluorocromos que tienen un rango de excitación con una longitud de onda menor que la fuente de luz, pero que al absorber dos o más fotones adquieren una excitación equivalente a la que causaría un solo fotón con una frecuencia doble. En la práctica, esto nos permite excitar con infrarrojos fluorocromos que, con un fotón, sólo se podrían excitar en el ultravioleta.

La elevada capacidad de penetración de los fotones convierte al método en ideal para estudiar muestras gruesas, un embrión vivo entero, por ejemplo. Con un sistema microscópico ordinario es preciso cortar las muestras. Al utilizarse longitudes de onda de excitación en el rango del infrarrojo cercano, la capacidad de penetración de los fotones es mayor que con cualquier otra longitud de onda, ya que la gran mayoría de las muestras biológicas son "transparentes" para la luz en el rango infrarrojo de los 700-900 nm.

Además, y ahí reside la última ventaja reseñada, sólo se produce la absorción multifotón en el plano focal y se utiliza luz infrarroja, menos energética y, por tanto, menos fototóxica. La microscopía multifotónica es, por tanto, ideal para la observación de muestras vivas, gracias a su alta penetración, baja fototoxicidad y posibilidad de usar múltiples fluorocromos.

Se han descrito diversas aplicaciones a la microscopía multifotónica *in vivo*; entre las más interesantes figura: la observación directa del depósito de beta amiloide en el cerebro de ratones vivos, con el seguimiento de su evolución durante semanas. También destaca la observación de embriones de hámster, que no sufrieron ninguna lesión, hasta el punto de que después fueron reimplantados en el útero y continuaron su desarrollo; tras el parto, fueron animales completamente sanos. Se ha aplicado también al estudio cuantitativo de la variación de ciertas moléculas en las mitocondrias.

Actualmente se encuentran en fase de desarrollo diversas aplicaciones avanzadas de la microscopía multifotónica. Entre las más prometedoras podemos destacar las biopsias ópticas no invasivas, que permitirán el diagnóstico por observación directa de los tejidos, sin necesidad de cortar y extraer fragmentos, sin dolor ni riesgo de infección o diseminación tumoral.

Antonio Serrano Hernández
Unidad de Microscopía Fotónica,
Centro Nacional de Biotecnología,
Madrid

Canibalismo en bacterias

Esporulación abortada

La práctica del canibalismo no es exclusiva de los seres humanos. Está descrita en diversos mamíferos (leones, chimpancés, etc.), aves e insectos, y no hace mucho se ha observado incluso en organismos aparentemente tan sencillos como las bacterias. En un gran número de situaciones, el canibalismo responde a un déficit de alimentos en la proximidad del organismo que lo practica. Sin embargo, en determinadas especies surge con otras finalidades, como preservar el linaje genético: en los leones el macho que consigue ocupar un puesto dominante en la manada devora los cachorros del león vencido. Por otra parte, en el ser humano el canibalismo obedece principalmente a motivos psicológicos o religiosos, aunque también se ha observado en situaciones extremas de carencia de alimentos, como ocurrió en el caso de los supervivientes de un accidente aéreo en los Andes en 1972, que tras padecer hambre durante varios días decidieron alimentarse con los restos de otros pasajeros fallecidos.

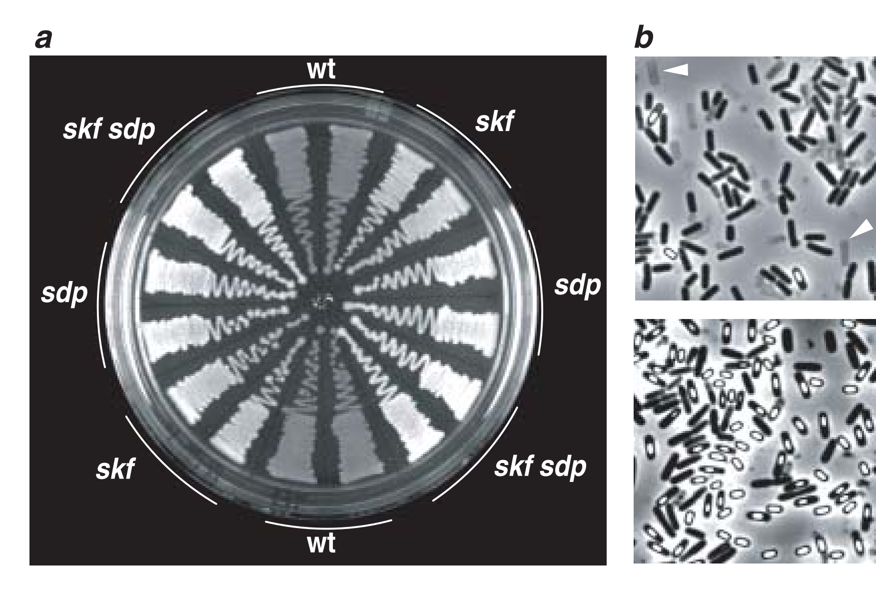
Nuestro grupo de la Universidad de Harvard ha descrito un comportamiento fratricida y caníbal en la bacteria del suelo *Bacillus subtilis*, pariente cercana de la bacteria responsable de la enfermedad del ántrax, *Bacillus anthracis*. Cuando sufre estrés ambiental, como por ejemplo, por falta de nutrientes, produce una espora, forma de vida que le permite sobrevivir en condiciones muy extremas (sequía, altas temperaturas, radiaciones, etc). En una población de *Bacillus subtilis*, sólo un reducido grupo de bacterias (de un 10 a 30 por ciento de la población) detecta en principio la ausencia de nutrientes. Cada una de ellas reacciona activando la formación de esporas. En un trabajo que hemos publicado en *Science* en 2003, demostrábamos que el grupo de bacterias que inicia el programa de esporulación es responsable de la muerte de las restantes bacterias de la población, es decir, de las que se han retrasado en activar la formación de esporas, genéticamente idénticas. Las bacterias supervivientes se alimentan de las bacterias que han matado; de ahí que las denominemos caníbales. Mediante este mecanismo se consigue retrasar la formación de esporas en la población.

¿Cómo funciona este fenómeno de canibalismo en *B. subtilis*? Las bacterias caníbales secretan al medio dos moléculas, necesarias para que se produzca este fenómeno: una toxina, un antibiótico de naturaleza peptídica, a la que denominamos Skf (*sporulation killing factor*, factor letal de esporulación), directamente implicada en la muerte de las demás bacterias de la comunidad, pero que no afecta a las bacterias que lo producen; y una proteína señal, denominada Sdp (*sporulation delaying protein*, proteína de retraso de la esporulación), que demora el proceso de esporulación en las bacterias que no lo inician y potencia el efecto de Skf al hacer que esas bacterias "hermanas" sean sensibles a tal antibiótico. (Por otra parte, hemos publicado en la revista *Cell*, en 2006, que Sdp puede funcionar también como una toxina.) En ausencia de Skf o de Sdp, o de los dos, no hay canibalismo.

Pero, ¿por qué es preferible sacrificar a gran parte de los individuos de la población en lugar de dejarles esporular, lo que les permitiría sobrevivir? Nuestros resultados nos permiten sugerir que este fenómeno tiene como propósito ralentizar el proceso de esporulación en las poblaciones bacterianas. Hemos observado que las comunidades que exhiben el comportamiento caníbal esporulan con peor eficacia que las poblaciones que hemos manipulado para que no lo exhiban (mutantes que no expresan Sdp o Skf). Nuestra interpretación de este resultado es la siguiente: el grupo de bacterias que inició el proceso de esporulación en respuesta a la ausencia de nutrientes elimina las restantes bacterias y, por tanto, consigue que se liberen al medio nuevos nutrientes. A su vez, la nueva aportación de nutrientes constituye una señal que les indica que no es necesario esporular y pueden seguir creciendo. En el caso de las bacterias mutantes que hemos manipulado para que no produzcan Skf o Sdp, no mueren las bacterias que no activaron el proceso de esporulación en primer lugar; en cambio, la carencia absoluta de nuevos nutrientes en el medio dispara el proceso de esporulación en toda la población.

¿Qué hay de negativo en el proceso de la esporulación para que sea preferible el sacrificio masivo de la población? El proceso de formación de una espora es largo, dura varias horas y requiere un elevado coste energético por parte de la bacteria. Además, a partir de una etapa temprana en el proceso ya no hay posibilidad de retorno, aunque las condiciones del ambiente cambien y se presenten nuevos nutrientes, lo que impediría una recuperación rápida de la población. Por último, también es bastante lento el proceso de germinación de la espora que regenera una bacteria.

Resulta evidente que la población que comienza a esporular se embarca en un complejo proceso durante el cual es más vulnerable. Por otra parte, *B. subtilis* competiría en desventaja con otros microorganismos que dispusiesen de mecanismos de supervivencia más simples, que les permitiesen recuperarse con mayor rapidez.



Las colonias de mutantes de *Bacillus subtilis* que no exhiben canibalismo (mutantes en los genes *skf*, *sdp* o en los dos) esporulan más lentamente que las colonias formadas por bacterias silvestres (wt). En la figura *a*, se observa que las colonias de mutantes que crecen sobre una placa de medio de cultivo son más brillantes que las colonias de las bacterias silvestres y esto se asocia a un mayor numero de esporas. En efecto, en la figura *b* se observan bacterias procedentes de las colonias de bacterias silvestres (wt) y de mutantes en *sdp*; como se puede apreciar, en el mutante *sdp* hay más bacterias brillantes (con esporas) que en el silvestre. Por otra parte, en la colonia de bacterias silvestres se aprecia un gran número de bacterias que exhiben menor intensidad (*señaladas con flechas blancas en la figura b, wt*); corresponden a bacterias muertas. Este tipo de bacterias no se observa en el caso del mutante *sdp*.

En efecto, numerosos tipos de bacterias responden a la carencia de nutrientes adoptando un estado fisiológico de reposo que no supone un proceso de diferenciación tan complejo como el de la esporulación y del que se recuperan con facilidad.

Por todo ello, pensamos que la decisión de esporular debe tomarse con mucha precaución, y posiblemente sea el último recurso que estas bacterias quieran emplear cuando las condiciones son adversas. En este contexto, el fratricidio y el canibalismo constituirían en *B. subtilis* una última oportunidad para evitar que la población forme esporas, un sacrificio de gran parte de la comunidad en aras del bien común.

José Eduardo González Pastor
Centro de Astrobiología, Madrid

Residuos mitocondriales

Ventana abierta hacia el pasado

El cuerpo humano está constituido por cientos de millones de células, unidades estructurales y funcionales que forman tejidos, órganos y sistemas. Cada una de esas células requiere de una fuente de energía para cumplir funciones vitales, como la reproducción y el crecimiento. La fuente de energía de la célula es la mitocondria, orgánulo del citoplasma que utiliza oxígeno del entorno para producir —a través de una serie de reacciones— trifosfato de adenosina (ATP), compuesto químico cuyos enlaces de alta energía son depositarios de energía biológica aprovechable por la célula.

La complejidad estructural y bioquímica de la mitocondria es tal, que recuerda la de las bacterias. Estos microorganismos unicelulares se cuentan entre las manifestaciones

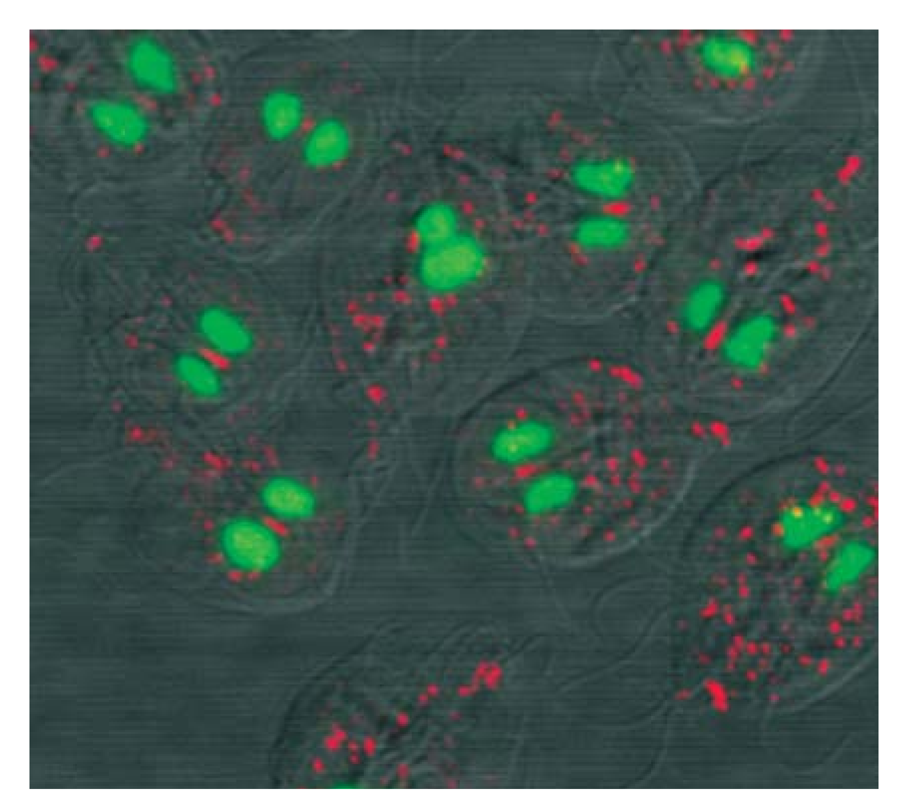


Imagen por microscopía confocal de *Giardia intestinalis*, protozoo parásito del que se ha supuesto, basándose en comparaciones bioquímicas y genómicas con organismos mitocondriales, que es la célula eucariota contemporánea más primitiva. (La técnica microscópica recoge sólo luz procedente del plano focal.) El color verde detecta el ADN cromosómico presente en el núcleo; el color rojo indica la presencia de las proteínas que sintetizan los agregados de Fe-S en los mitosomas de *Giardia*. La existencia de estos residuos mitocondriales descarta la posibilidad de que el protozoo represente una de las células protoeucariotas premitocondriales que algunos científicos creen hubo en etapas tempranas de la evolución celular.

de vida más elementales y primitivas de nuestro planeta. La investigación genética y bioquímica ha llegado a la conclusión de que la mitocondria fue, en un pasado remoto, un microorganismo de vida libre. Hace unos dos mil millones de años se estableció como huésped en el interior de una célula y trabó con ella una relación endosimbionte, de beneficio mutuo. Según se supone, la interdependencia metabólica entre huésped y anfitrión consolidó el asentamiento del huésped como orgánulo mitocondrial. Y, con ello, señaló el origen de las células eucariotas y la bifurcación evolutiva entre éstas y las bacterias.

La función respiratoria de la mitocondria es esencial para los organismos aerobios, vale decir, para aquellos cuya supervivencia depende del oxígeno externo. Pero en la naturaleza abundan organismos eucariotas unicelulares de vida anaerobia, esto es, que no basan su respiración y concomitante generación de ATP en el consumo de oxígeno, sino en el de otras moléculas orgánicas. Entre ellos se encuentran los protozoos *Giardia intestinalis, Entamoeba histolytica, Trachipleistophora hominis* y *Cryptosporidium parvum,* parásitos de interés en medicina, pues causan trastornos digestivos y musculares en humanos y en otras especies.

La microscopía electrónica reveló que los protozoos mencionados carecen de mitocondrias. Pero el empleo de proteínas mitocondriales como marcadores moleculares en organismos amitocondriales ha permitido descubrir la presencia, en éstos, de mitosomas.

A primera vista, tales orgánulos guardan escaso parecido con las mitocondrias. Los mitosomas, minúsculos en su tamaño, carecen de un genoma residual característico; se hallan también privados de los componentes bioquímicos necesarios para la síntesis de ATP por respiración aerobia. No poseen ni las enzimas del ciclo de Krebs, ni los citocromos que participan en el transporte de electrones. Pero los mitosomas sí se hallan rodeados por una doble membrana, lo mismo que las mitocondrias, lo que denuncia un origen endosimbionte. Está, además, demostrado que los mecanismos de transporte de proteínas al interior del mitosoma equivalen, desde una perspectiva funcional, a los que operan en la mitocondria.

La prueba más clara de que los mitosomas representan residuos mitocondriales nos la ofrece la identificación en ellos de la biosíntesis de agregados moleculares de hierro y azufre (Fe-S), una función esencial de la mitocondria. Los agregados de Fe-S son componentes fundamentales de muchas proteínas necesarias para la supervivencia de la célula en ambientes aerobios y anaerobios. En ese hallazgo se apoya una posibilidad sugerente: la exigencia de agregados de Fe-S manifestada por la célula tal vez represente la fuerza selectiva universal que ha operado durante cientos de millones de años para la retención del endosimbionte mitocondrial en las células eucariotas.

La presencia de mitosomas en *Giardia intestinalis* (*véase la figura*) y en otros organismos unicelulares amitocondriales indica que nos hallamos ante organismos descendientes de ancestros que en un pasado remoto alojaron mitocondrias, cuyas funciones se han ido perdiendo paulatinamente a lo largo del proceso evolutivo. Los residuos mitocondriales nos ofrecen, pues, una ventana hacia el pasado. Pero su importancia evolutiva constituye sólo una parte del atractivo científico de los mitosomas. El estudio de las funciones de tales residuos podría terminar por identificar componentes celulares vitales para los organismos amitocondriales que podrían servir de blancos moleculares en nuestra búsqueda constante de nuevos y más eficientes fármacos antiparasitarios.

JORGE TOVAR TORRES
Real Colegio Holloway, Universidad de Londres

Josep Maria Gili



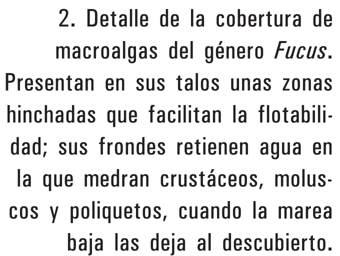
1. Paisaje intermareal de una playa en la Bretaña francesa. Se observan distintos horizontes en función de la cantidad y tamaño de las rocas; el más evidente está dominado por microalgas adheridas a guijarros semienterrados en la arena.

Vida a ritmo de marea

La biología marina se desarrolló al ritmo de las mareas. Cuando el mar se retira de la playa, deja al descubierto la vida que ocultaban las aguas. Con las exploraciones naturalistas del siglo XVII aparecieron las primeras hipótesis sobre la biodiversidad y funcionamiento de los océanos. Hoy todavía, las zonas intermareales siguen siendo un libro abierto para cualquiera que se disponga a observar y estudiar la vida marina. Al retirarse las aguas, quedan al descubierto extensiones de arena que se diría estériles y desérticas. La verdad es que no hay palmo donde no medren miles de organismos en los intersticios que conservan el agua, retenida por capilaridad entre los granos de arena.

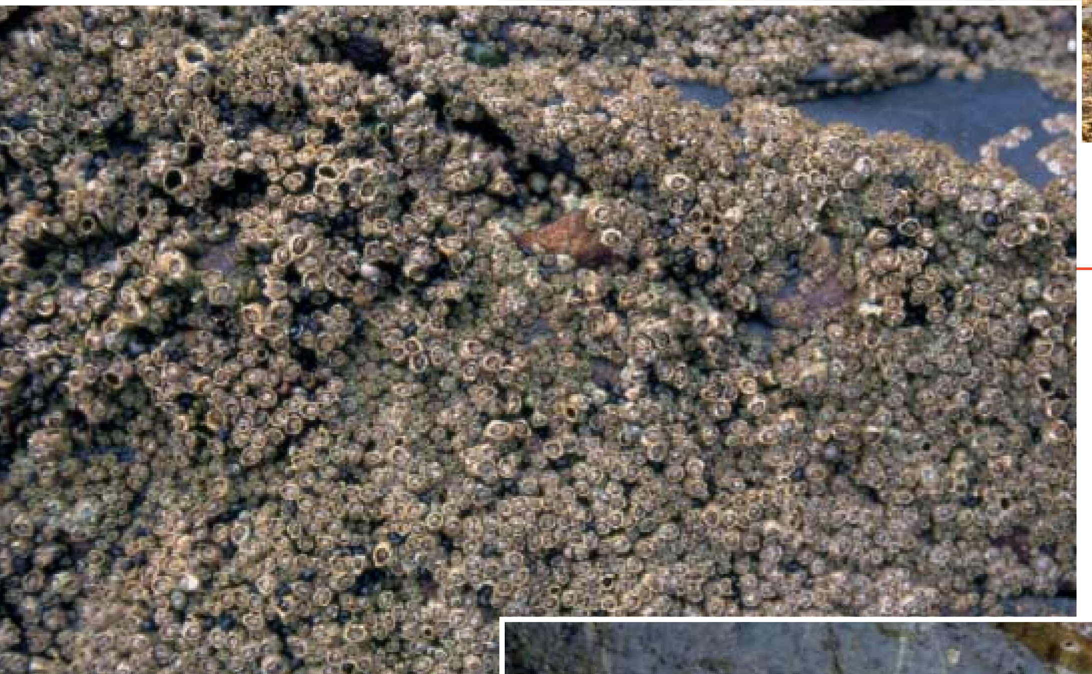
Pero el fenómeno más llamativo corresponde a la extraordinaria diversidad de comunidades en playas y ensenadas. Diversidad vinculada a la propia variedad de sustratos. En un suelo de rocas de distinto tamaño y diferente grado de agregación, se instalará una biota sésil variopinta, al par que se posibilita la creación de cubetas con agua. Además de la fauna de los intersticios granulares, hay múltiples organismos escondidos entre las algas.

La intensidad y el ritmo de las mareas modulan la vida en la zona intermareal. Si el agua deja al descubierto una superficie extensa, quedará expuesta a la desecación, lo que condicionará la supervivencia de las especies. Una visita a los fondos costeros abandonados por la marea puede convertirse en la primera, y quizá más gratificante, lección de biología marina.





2. Detalle de la cobertura de macroalgas del género *Fucus*. Presentan en sus talos unas zonas hinchadas que facilitan la flotabilidad; sus frondes retienen agua en la que medran crustáceos, moluscos y poliquetos, cuando la marea baja las deja al descubierto.



3. Rocas recubiertas por crustáceos sésiles del género *Chthamalus*. Están provistos de valvas que, al cerrarse, retienen agua en su interior, la suficiente para resistir las horas de marea baja.



4. Moluscos del género *Patella*. Merced a una valva que se adhiere con fuerza al sustrato y mantiene la humedad en el interior, presentan una resistencia notable a la desecación y a ser arrancados por las corrientes.

FOTOGRAFIAS JOSE MARIA GILI



¿Qué hacer

Se prevé que el carbón, abundante y barato, alimentará en el futuro las centrales eléctricas. ¿Podremos evitar que destruya el medio?

David G. Hawkins, Daniel A. Lashof y Robert H. Williams

RESUMEN

- Gran parte de la electricidad se genera por combustión de carbón; ello libera a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono, que provoca cambios climáticos.
- En las nuevas centrales de gasificación, la extracción del CO_2 resulta más sencilla y económica que en las clásicas. El gas se almacena de forma segura en el subsuelo.
- La implantación de la captura y el almacenaje del carbono debe empezar sin tardanza para frenar el calentamiento global.

En mayor medida de lo que se cree, hacerle frente al cambio climático entraña habérselas con el problema de las emisiones de gases de las centrales eléctricas de carbón. A menos que la humanidad adopte sin tardanza medidas para limitar la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) que se libera a la atmósfera en la combustión del carbón empleado para generar electricidad, pocas serán las probabilidades de lograr algún control sobre el calentamiento global.

El carbón —que alimentó la Revolución Industrial— constituye una fuente de energía que causa especial preocupación. Ello se debe, en parte, a que su combustión produce una cantidad notablemente mayor de dióxido de carbono por unidad de electricidad generada que la del fuelóleo o del gas natural. Además, el carbón es barato y seguirá siendo abundante mucho después de que el petróleo y el gas natural empiecen a escasear. Por su abundancia y bajo precio, su consumo se está generalizando en los EE.UU. y en otros países; es de esperar que esta ten-



1. LA COMBUSTION DE CARBON envía a la atmósfera cada año casi 10.000 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono.

con el *carbón*?

dencia ascendente continúe en las regiones ricas en recursos carboníferos. De hecho, sólo en los EE.UU., se espera que las compañías generadoras construyan el equivalente de casi 280.500 megawatt (MW) en centrales eléctricas de carbón entre 2003 y 2030. Entretanto, China está construyendo ya cada semana el equivalente a una gran central térmica de carbón. A lo largo de su vida útil, estimada en unos 60 años, las nuevas plantas generadoras que operen en 2030 podrían arrojar conjuntamente tanto dióxido de carbono a la atmósfera como ha sido liberado por todo el carbón quemado desde los albores de la Revolución Industrial.

El auge previsto del carbón inquieta no sólo a los que se preocupan por el cambio climático, sino también a quienes velan por otros aspectos ambientales o por la salud y el bienestar de la población. El precio del carbón en el mercado puede ser bajo, pero resultan elevados los costes reales de su extracción, procesamiento y consumo. El uso de carbón conlleva una panoplia de consecuencias perniciosas: montes vaciados, contaminación atmosférica debida a emisiones ácidas o tóxicas, y aguas degradadas con desechos y escorias. Su extracción entraña graves riesgos para los mineros; en ocasiones, la muerte.

Sumados todos esos efectos, la producción y conversión del carbón en energía útil cons-

tituye una de las actividades más destructivas del planeta.

En concordancia con el interés por los problemas climáticos en este número especial de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, examinaremos los métodos que contribuyen a evitar que el CO_2 generado en la combustión del carbón llegue a la atmósfera. Inútil decir que también deben reducirse parejamente los efectos ambientales, de seguridad y salubridad derivados de la producción y el empleo del carbón. Por suerte, existen ya técnicas económicamente viables para tratar las emisiones de dióxido de carbono y estos otros problemas, si bien el deseo de su pronta implantación sigue estando muy rezagado.

Almacenaje geológico

Las técnicas que las centrales térmicas aplicarían para evitar que la mayor parte del dióxido de carbono que producen llegase a la atmósfera se denominan colectivamente CAC ("captura y almacenaje del CO_2") o secuestro geológico del carbono. Tales procedimientos suponen la separación de gran parte del CO_2 que se crea cuando el carbón se convierte en energía útil y el transporte del mismo a sitios donde pueda almacenarse en las profundidades de medios porosos; sobre todo, en campos petrolíferos, yacimientos de gas agotados o en formaciones salinas (estratos geológicos permeables saturados de agua salada).

Todos los componentes técnicos necesarios para el secuestro del carbono en las plantas de conversión están disponibles en el mercado. Se han ensayado ya en aplicaciones sin nexo con la mitigación del cambio climático, si bien es cierto que los sistemas integrados no se han construido todavía a la escala necesaria. Las técnicas de captura se han desplegado por todo el mundo en la fabricación de compuestos químicos (fertilizantes, por ejemplo) y en la purificación del gas natural de fuentes contaminadas con dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno ("gas fétido").

Se ha adquirido una experiencia industrial considerable en el almacenaje de CO_2 en instalaciones de purificación de gas natural (sobre todo en Canadá), así como en la inyección de CO_2 para la extracción forzada de petróleo (principalmente en los EE.UU.). Los procesos de extracción forzada dan cuenta de casi todo el CO_2 que se ha enviado a reservorios subterráneos. En la actualidad, cada año se inyectan alrededor de 35 millones de toneladas métricas de gas para exprimir más petróleo de campos ya maduros; ello supone alrededor del 4 por ciento de la producción de crudo de los EE.UU.

La implantación de la CAC en las centrales eléctricas alimentadas con carbón resulta imperativa si se quiere mantener la concentración atmosférica de dióxido de carbono en valores aceptables. El marco referencial sobre el cambio climático, aprobado por la asamblea de las Naciones Unidas en 1992, exige la estabilización de la concentración atmosférica de CO_2 en un valor "seguro", pero no precisa cuánto sería ese valor máximo.

En la opinión de numerosos expertos, para evitar cambios climáticos inaceptables tal concentración debería mantenerse por debajo de 450 partes por millón en volumen (ppmv). Hacer realidad un objetivo tan ambicioso requiere que las compañías energéticas empiecen a implantar proyectos de CAC a escala comercial dentro de dos o tres años, y que luego los generalicen con prontitud. Esta referencia de estabilización no se alcanzará sólo con el CAC, pero es plausible que se logre si se conjuga con la mejora de la eficiencia energética, el uso generalizado de energías renovables y otras medidas ecofavorables.

A finales de 2005, el panel intergubernamental del cambio climático (IPCC) estimó que los medios geológicos del planeta podrían secuestrar al menos dos billones de toneladas métricas de CO_2, cantidad superior a la que probablemente generarán las centrales basadas en combustibles fósiles durante todo el siglo XXI. Sin embargo, antes de ponerlos en servicio, la sociedad querrá estar segura de que los posibles puntos de secuestro se han evaluado cuidadosamente en cuanto a su capacidad de retención de dióxido de carbono. Dos tipos de riesgo causan preocupación: los escapes súbitos y las fugas graduales.

El rápido flujo al exterior de grandes cantidades de CO_2 resultaría letal para quienes se encontrasen en las cercanías. Pero según el IPCC, las liberaciones repentinas y peligrosas —como la ocurrida en 1986 en Lago Nios, en Camerún, en que una gran masa de CO_2 de origen volcánico asfixió a 1700 aldeanos de los alrededores y a millares de cabezas de ganado— son improbables en los proyectos de almacenaje de CO_2, si éstos se diseñan con rigor y se emplazan en formaciones geológicas porosas y profundas, cuidadosamente seleccionadas.

También la filtración gradual de dióxido de carbono en el aire reviste importancia, pues, con el tiempo, neutralizaría los objetivos que se propone la CAC. En el informe del IPCC de 2005 se estimaba que la fracción retenida en reservorios escogidos y gestionados superaría el 99 por ciento en un período de 1000 años. Lo que está por demostrar es si, en la práctica, los técnicos pueden mantener las fugas de CO_2 en niveles que eviten riesgos inaceptables para la salud pública y el entorno.

Posibilidades técnicas

Los estudios de posibles diseños indican que, con las técnicas existentes de generación de electricidad, se capturaría en forma de CO_2 entre un 85 y un 95 por ciento del carbono contenido en el carbón, siendo el resto liberado en la atmósfera.

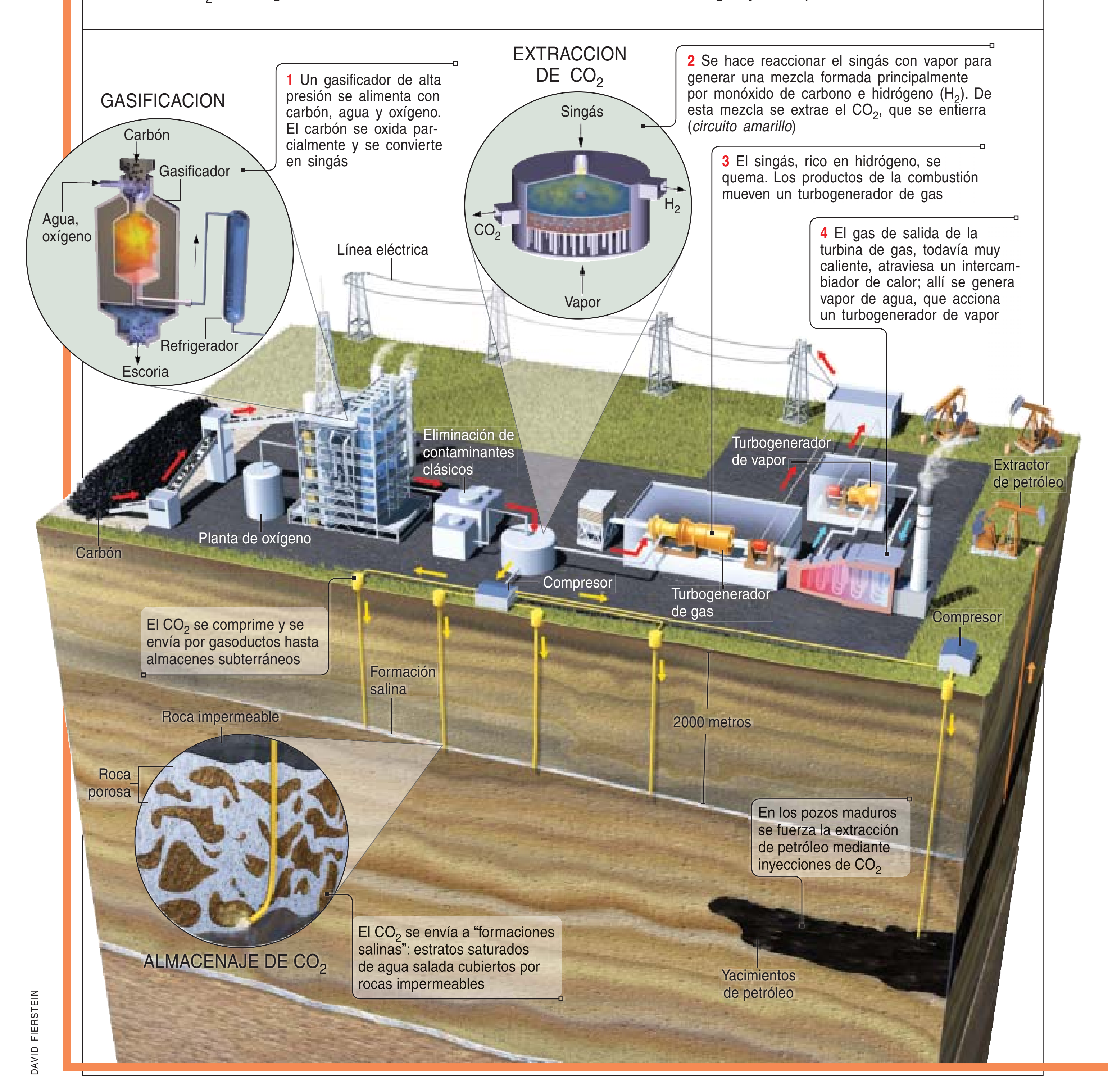
Las técnicas de conversión de carbón en electricidad que lleguen a predominar serán las que alcancen, a coste mínimo, los objetivos de mitigación del cambio climático. Los métodos de CAC serán fundamentalmente distintos en las centrales estándar de ciclo carbón-vapor y en las más modernas de ciclo combinado con gasificación integrada (CCGI). Aunque en nuestros días la electricidad generada en centrales CCGI es algo más cara que la procedente de las de ciclo carbón-vapor, parece que la técnica CCGI se convertirá en la opción menos onerosa y más eficiente para el secuestro del carbono.

En las centrales térmicas clásicas el carbón se quema en una caldera a presión atmosférica. El calor que se genera en la combustión transforma el agua en vapor (a presión y temperatura elevadas), que hace girar una turbina; la energía mecánica de ésta se convierte en elec-

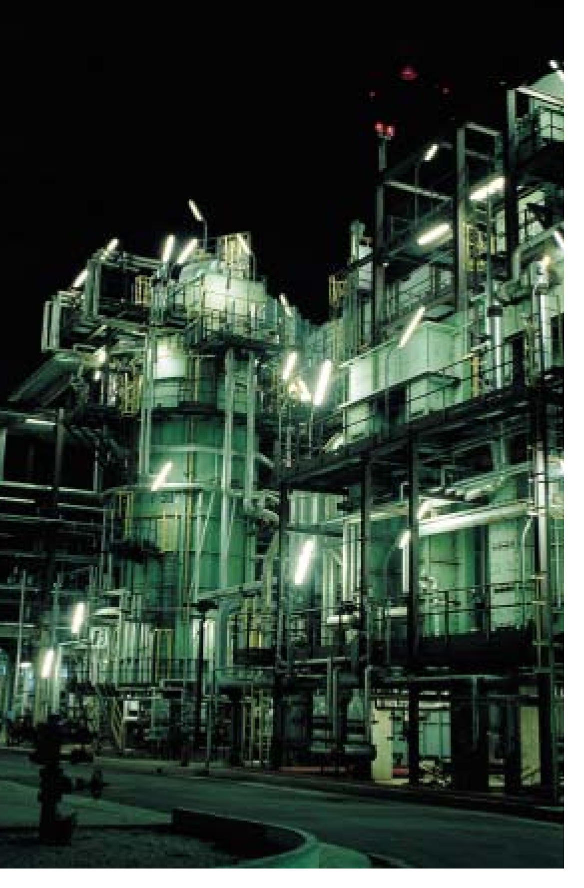
PAGINAS ANTERIORES: ROLAND WEIHRAUCH *dpa/Corbis (fotografía)*; FOTOILUSTRACION: *SCIENTIFIC AMERICAN*

EXTRACCION Y ALMACENAJE DE DIOXIDO DE CARBONO

Para frenar el cambio climático, los autores instan a las compañías eléctricas a construir centrales de carbón de ciclo combinado con gasificación integrada (CCGI), dotadas de equipos de captura y almacenaje de carbono (*abajo*), en vez de las centrales de vapor clásicas. En estas últimas, el calor de la combustión del carbón se usa para generar vapor, que acciona un turbogenerador. Para lograr la captura del carbono en una térmica de vapor, habría que extraer el CO_2 de los gases de humero. En una central CCGI, en cambio, se parte de una reacción de combustión incompleta (se limita el oxígeno) para convertir el carbón en "singás" (gas de síntesis), que se compone fundamentalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. La remoción del CO_2 a partir del singás resulta más sencilla y económica que a partir de los humeros de las centrales de carbón-vapor. El singás residual posterior a la extracción del CO_2, rico en hidrógeno, se quema y se utiliza para mover turbinas de gas y de vapor.



DAVID FIERSTEIN



2. LA TECNICA DE CICLO COMBINADO con gasificación integrada opera ya en algunas centrales térmicas. La que se muestra en la fotografía, en Italia, está en servicio desde 1994. Generan un total de 3600 MW de electricidad.



tricidad mediante un alternador. En las centrales modernas, los gases que se producen en la combustión (gases de humero) pasan luego por dispositivos que retiran partículas y óxidos de azufre y nitrógeno; por fin se expelen a la atmósfera a través de grandes chimeneas.

El dióxido de carbono se extraería de los gases de humero de estas centrales térmicas, una vez eliminados los contaminantes clásicos. Dado que los humeros contienen una cantidad importante de nitrógeno —el carbón se quema en aire, que es nitrógeno en un 80 por ciento—, el dióxido de carbono debería extraerse a baja presión y concentración. Ello supone que la recuperación del CO_2 debería manejar grandes volúmenes de gases mediante procesos caros y que exigen mucha energía. Luego el CO_2 capturado se comprimiría y conduciría por tubos hasta un enclave adecuado para su confinamiento.

En un sistema de ciclo combinado, el carbón no se quema; sólo se oxida parcialmente, a presión elevada, en un gasificador o "gasógeno". (Se hace reaccionar con cantidades limitadas de oxígeno, procedente de una planta de fragmentación del aire, y con vapor de agua.) El producto de la gasificación se denomina gas sintético o, brevemente, "singás"; está compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno, no diluidos con nitrógeno.

En la práctica actual, en los sistemas CCGI se eliminan casi todos los contaminantes típicos del singás. Luego se quema para mover turbogeneradores de gas y vapor, en lo que corresponde a un sistema de ciclo combinado.

En una central CCGI proyectada para la captura de CO_2, el singás que sale del gasógeno, una vez frío y libre de partículas, se haría reaccionar con vapor para producir una mezcla gaseosa, compuesta principalmente por dióxido de carbono e hidrógeno. Se procedería luego a la extracción, deshidratación, compresión y transporte del CO_2 a un punto de almacenaje. El gas restante, rico en hidrógeno, se quemaría en una central de ciclo combinado para generar electricidad.

Los análisis indican que la captura de dióxido de carbono en las centrales CCGI que utilicen carbones bituminosos de alta calidad comportaría menores penalizaciones en energía y en costes; reducirían también los costes totales de generación por debajo de los correspondientes a centrales estándar de carbón que capturasen y almacenasen CO_2. Los sistemas de gasificación extraen el CO_2 de un flujo gaseoso donde se encuentra a concentración y temperatura elevadas; el proceso de extracción sería, por ello, mucho más sencillo que en las instalaciones clásicas de vapor. (La amplitud de los beneficios es menos clara en el caso de carbones sub-bituminosos de calidad inferior o en el de los lignitos, que se han estudiado menos.) La eliminación previa a la combustión de los contaminantes clásicos (entre ellos, el mercurio) permite lograr niveles muy bajos de emisiones, a costes reducidos, y con menores penalizaciones energéticas que con los sistemas de depuración de gases de humero en plantas estándar.

El dióxido de carbono capturado se transporta, por gasoducto, a varios centenares de kilómetros de distancia, hasta estaciones de secuestro geológico, donde se almacena con la presión obtenida durante la captura. El almacenaje a mayores distancias puede exigir, no obstante, estaciones de bombeo (recompresión) para compensar las pérdidas por rozamiento en la transferencia a través del gasoducto.

En total, la implantación de los sistemas CAC en centrales térmicas de carbón exige mayor consumo de combustible para generar un kilowatt/hora que cuando el CO_2 se libera directamente en la atmósfera: alrededor de un 30 por ciento más en el caso de térmicas carbón-vapor y algo menos del 20 por ciento en las térmicas CCGI. Pero el consumo total de carbón no aumentaría necesariamente, pues al ser mayor el coste de la electricidad generada con él en una central adaptada a la técnica CAC, se amortiguaría la demanda correspondiente, haciendo que las fuentes de energía renovable y los productos de mayor eficiencia energética les resultasen más atractivos a los consumidores.

El coste del CAC dependerá del tipo de central, de la distancia al punto de almacenaje, de las características del reservorio y de las posibilidades de venta del CO_2 capturado (verbigracia, para la extracción forzada de petróleo). En un estudio reciente, en el que participó uno de los autores (Williams), se estimaron los costes incrementales de generación eléctrica correspondientes a dos metodologías de CAC para centrales de ciclo combinado en condiciones típicas de producción, transporte y almacenaje.

En el caso del secuestro de CO_2 en una formación salina situada a 100 kilómetros de la central, el incremento del coste debido a la CAC sería de 1,9 céntimos por kWh (que deben sumarse a los 4,7 céntimos del coste de generación de una central de ciclo combinado que libere directamente el CO_2 en la atmósfera: un recargo del 40 por ciento).

En el caso de la CAC conjuntada con extracción forzada de petróleo a una distancia de 100 kilómetros de la central térmica no se producen incrementos netos en el coste de producción mientras el precio del petróleo se mantenga por encima de

los 35 dólares por barril (precio muy inferior a los actuales).

Calendario de implantación de la CAC

Un gran número de compañías eléctricas del mundo industrializado reconocen que los problemas ambientales acabarán obligándolas a implantar sistemas de CAC para seguir utilizando carbón. Pero en lugar de construir centrales que procedan a la captura y almacenaje del dióxido de carbono, la mayoría se decanta por la construcción de centrales de vapor, afirmando que estarán previstas para capturar CO_2 (mediante sistemas convertibles) cuando la CAC sea obligatoria.

Las eléctricas acostumbran defender tales decisiones haciendo notar que ni los EE.UU. ni la mayoría de los países que hacen uso intensivo de carbón han instituido aún políticas de mitigación del cambio climático que conviertan en competitiva a la CAC en usos independientes de la extracción forzada de petróleo. Al perder los ingresos derivados de la venta de CO_2 a las empresas petroleras, a las nuevas centrales de carbón que utilizasen las técnicas actuales, la aplicación de CAC les resultaría rentable sólo si la penalización por emisiones de CO_2 fuese, como mínimo, de 25 a 30 dólares por tonelada métrica. Pero en muchas de las propuestas en EE.UU. para la mitigación del cambio climático se contemplan penalizaciones bastante menores para las eléctricas que liberen CO_2 (o lo que viene a ser lo mismo, pagos por créditos para la reducción de las emisiones de CO_2).

Ahora bien, peca de miope la política de retrasar la aplicación de sistemas de CAC en las centrales de carbón hasta que los costes del control del CO_2 superen los costes de la CAC. Por diversas razones, las industrias del carbón, las eléctricas y la propia sociedad acabarían beneficiándose, si empezase ahora mismo el despliegue de centrales dotadas de CAC.

En primer lugar, el camino más rápido para reducir los costes de la CAC consiste en "aprender haciendo": la acumulación de experiencia en la construcción y la gestión de tales plantas. Cuanto más rápido se acumule esa experiencia, con mayor prontitud crecerá la pericia en la técnica correspondiente y más veloz será también el descenso de los precios.

En segundo lugar, la pronta instalación de equipos de CAC tendría que redundar a la larga en menores dispendios. La mayor parte de las centrales que se están construyendo continuarán en servicio dentro de varios decenios, cuando es de

LACRAS DEL CARBON

Por mucho que se hable de "carbón limpio", el carbón es sucio. Aunque la captura y almacenaje del carbono impedirían que gran parte del dióxido de carbono llegara a la atmósfera, la producción y el consumo de carbón sigue siendo uno de los procesos industriales más destructivos. Mientras el mundo siga consumiendo carbón, más se deberá hacer para mitigar los daños que causa.

RIESGOS DE LA MINERIA

La minería del carbón se cuenta entre las ocupaciones de mayor peligro. Según informes oficiales de 2005, unas 6000 personas (16 al día, por término medio) murieron en China debido a inundaciones, desplomes, incendios o explosiones en las minas. Las estimaciones oficiosas hablan de casi 10.000. Unos 600.000 mineros chinos sufren de pneumoconiosis o "pulmón negro".

Las medidas de seguridad en los EE.UU. son superiores a las de China. En 2005 se registró en ese país norteamericano la mortalidad más baja de todos los tiempos: 22 fallecidos. Pero tampoco sus minas son perfectas, como se ha demostrado en una serie de fatalidades a comienzos de 2006.

EFECTOS AMBIENTALES

La minería carbonera clásica y los métodos de procesamiento y transporte llenan el territorio de cicatrices y contaminan las aguas, con daños para humanos y ecosistemas. Las técnicas mineras más agresivas dejan los suelos sin bosques y hacen volar por los aires las cimas de los montes. El material de recubrimiento que se retira cuando se descubre una veta de carbón suele verterse en los valles cercanos, donde a menudo entierra o ciega ríos y corrientes. Las operaciones "a cielo abierto" rompen en trozos los ecosistemas y cambian la forma del paisaje. Aunque la legislación exige que el terreno se restaure terminada la extracción, a menudo se hace de forma incompleta. Al reemplazarse los bosques por plantas herbáceas foráneas, los suelos se compactan y los cursos de agua se contaminan.

La minería en galerías subterráneas provoca problemas graves en la superficie. Las minas se desploman y los terrenos superficiales ceden o se hunden, con daños para hogares y carreteras. Los drenajes ácidos procedentes de las minas, que por lixiviación de compuestos de azufre de las gangas del carbón alcanzan las aguas superficiales, han envenenado millares de ríos. Los lixiviados ácidos liberan metales pesados que corrompen las aguas freáticas.



UN DERRAME DE LODOS ACIDOS de una mina de carbón de Pennsylvania tiñe de color naranja el lecho de este torrente.

RICK SMITH *AP Photo*



EMISIONES TOXICAS

En los EE.UU., las térmicas de carbón son responsables de más de dos terceras partes de las emisiones de dióxido de azufre y de alrededor de la quinta parte de las emisiones de óxidos de nitrógeno. El dióxido de azufre reacciona con el polvo atmosférico y forma partículas de sulfatos, que además de provocar lluvia ácida contribuyen a la contaminación por partículas microscópicas, una clase de contaminación vinculada con millares de fallecimientos prematuros a causa de enfermedades pulmonares, contando sólo EE.UU. Los óxidos de nitrógeno se combinan con hidrocarburos para generar ozono a ras de suelo que, a su vez, provoca la formación de una niebla tóxica ("smog").

Sólo en EE.UU., las centrales de carbón emiten unas 48 toneladas métricas de mercurio al año. Este metal, sumamente tóxico, permanece en el ecosistema. Transformado en metil-mercurio, se acumula en los tejidos de los peces. La ingesta de mercurio resulta particularmente dañina para los fetos y los niños pequeños durante las etapas de rápido desarrollo cerebral, pues provocan lesiones en el sistema nervioso.

prever que sí serán obligatorios los sistemas de CAC. La reconversión y adaptación de las centrales resultará intrínsecamente más onerosa que la instalación de CAC en las plantas de nueva construcción. Además, mientras no exista limitación para las emisiones de CO_2, las técnicas tradicionales carbón-vapor-eléctricas seguirán prefiriéndose frente a las técnicas más modernas, basadas en la gasificación, en las que la CAC resulta más económica.

Por último, una implantación pronta permitiría seguir utilizando combustibles fósiles a corto o medio plazo (mientras no se impongan otras fuentes de energía menos agresivas con el medio), sin llevar las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono más allá de los límites tolerables. Nuestros estudios indican que la estabilización de las concentraciones de CO_2 en 450 ppmv resultaría factible de aquí a cincuenta años, si la producción eléctrica a partir de carbón se "descarbonara" y se instauraran las medidas restantes expuestas en el recuadro "Hacia la mitigación de CO_2".

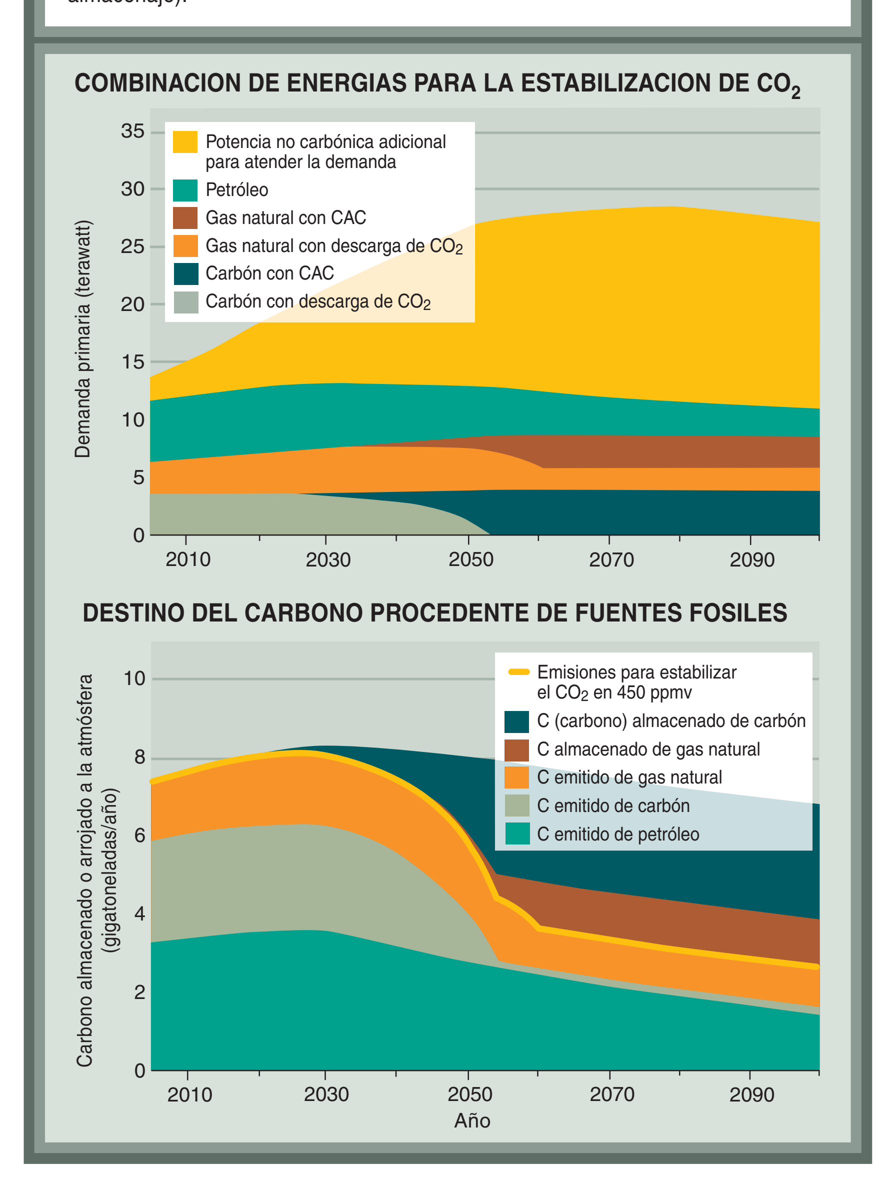
Tal empeño supondría la descarbonación de 36 GW de nueva capacidad de generación en el año 2020 (valor que correspondería al 7 por ciento de la potencia instalada en las térmicas de carbón que se estima van a construirse en el planeta durante el decenio que comienza en 2011 con el sistema económico de ahora). A partir de 2020, durante los 35 años siguientes, la captura de CO_2 tendría que aumentar a una tasa media situada en torno al 12 por ciento anual.

Una marcha de ritmo tan sostenido supera las tasas típicas de crecimiento de los mercados energéticos, pero no carece de precedentes. Es muy inferior a la tasa de expansión de la capacidad de generación nuclear en su apogeo (de 1956 a 1980), época en la que la capacidad global aumentó a razón de un 40 por ciento anual. Además, las tasas de expansión de las capacidades mundiales de producción eléctrica solar y eólica se han mantenido en torno a un 30 por ciento desde los primeros años noventa del siglo pasado. En ninguno de los tres casos reseñados, tal crecimiento no hubiera sido práctico sin medidas de apoyo desde el sector público.

HACIA LA MITIGACION DEL CO_2

A tenor de nuestros cálculos, una pronta aplicación de técnicas de captura y almacenaje del carbono (CAC) permitiría atender las demandas mundiales de energía y, al propio tiempo, limitar la concentración de dióxido de carbono atmosférico a 450 partes por millón en volumen (ppmv). Este objetivo se alcanzaría, si de aquí a medio siglo, se aplicase el secuestro de carbono a todo el carbón consumido y a una cuarta parte del gas natural utilizado, a la vez que se aumentara rápidamente la eficiencia energética de equipos e instalaciones y se septuplicara la producción de fuentes de energía que no liberen carbono. En estas condiciones, el consumo total de combustibles fósiles se incrementaría modestamente con relación al actual: a mediados de siglo, el consumo de carbón sería algo mayor que el del presente, el consumo de petróleo habría caído un 20 por ciento y el de gas natural aumentado en un 50 por ciento.

Para recorrer este camino, las tasas de crecimiento correspondientes al consumo de combustibles fósiles deberían empezar a disminuir ahora mismo; la CAC debería iniciarse a principios del próximo decenio para el carbón y del próximo cuarto de siglo para el gas natural. En el diagrama superior se ha representado la energía que habrían de suministrar las diversas fuentes si se siguiera este plan de mitigación. En el diagrama inferior se observan las cantidades totales de carbono extraídas de la Tierra (emisiones más almacenaje).



JEN CHRISTIANSEN

Según nuestros cálculos, los costes del despliegue de la CAC serían también asumibles. Aplicando hipótesis conservadoras —a saber, que no se produjeran cambios técnicos con el tiempo— estimamos que el monto total de la captura y almacenaje de todo el CO_2 producido por las plantas generadoras de carbón durante los próximos 200 años sería de 1,8 billones de dólares (en dólares de 2002). Si bien parece un precio elevado, equivale apenas al 0,07 por ciento del valor (en dólares de hoy) del producto mundial bruto en ese mismo período de tiempo.

Así pues, desde el punto de vista técnico y económico, una descarbonación rápida resultaría factible, aunque para confirmar esta conclusión se requieren análisis regionales detallados.

Necesidad de impulso normativo

Las buenas razones expuestas para emprender sin tardanza acciones concertadas de CAC no harán que la industria tome esa dirección, a menos que exista el acicate de nuevas normativas. Tales iniciativas habrán de formar parte de un plan más amplio, orientado hacia el control de todas las emisiones de dióxido de carbono, cualquiera que sea su fuente.

En los EE.UU. ha de promulgarse en breve un plan nacional de limitación de emisiones de CO_2, con el fin de introducir la normativa e incentivos mercantiles necesarios para el desplazamiento de inversiones hacia las técnicas energéticas menos contaminantes. Los plutócratas estadounidenses y los organismos reguladores están cada vez más de acuerdo en que la imposición de restricciones cuantificables y legalmente exigibles asociadas al problema del calentamiento planetario resultan inevitables e imperativas.

Para asegurar que las compañías eléctricas lleven a la práctica estas reducciones de forma rentable, habría de crearse un mercado de compraventa de cuotas de emisión de CO_2, parecido al existente ya para las emisiones sulfurosas responsables de la lluvia ácida. Así, las organizaciones que superasen los límites de emisión asignados podrían adquirir las cuotas de quienes lograran mantenerse por debajo de esos valores.

Para que se respeten los límites máximos de dióxido de carbono a coste mínimo resulta de importancia crítica la implantación de normas y técnicas de eficiencia energética, así como el aumento de la producción de energías renovables. Una parte de los ingresos por permisos de emisión (creado por un programa de compraventa de cuotas) debería asignarse a la creación de un fondo que ayudase a superar las barreras institucionales y los riesgos técnicos que dificultan el despliegue generalizado de métodos de mitigación del CO_2, métodos, que, por lo demás, son rentables.

Pero aunque se promulgase un plan de compraventa de cuotas de CO_2, es posible que en los años próximos el valor económico de la reducción de emisiones de CO_2 no resultara, en un principio, suficiente para convencer a las eléctricas de que invirtieran en sistemas de generación con CAC. Si se desea evitar la construcción de otra generación de térmicas estándar de carbón, el gobierno deberá establecer incentivos que promuevan la CAC.

Un método consistiría en el empeño de que una porción progresivamente mayor del total de producción eléctrica basada en carbón procediera de plantas que cumplan normas de baja emisión de CO_2 (un máximo de unos 30 gramos de carbono por kWh). Este objetivo es posible con las técnicas de CAC actuales. Se obligaría a los productores de electricidad que usen carbón a incluir en sus carteras de suministro una fracción cada vez mayor de electricidad "descarbonada". Cada productor podría generar la cuota exigida de electricidad descarbonada o adquirir cuotas descarbonadas a otros productores. De este modo, los incrementos de costes debidos a la CAC para la energía generada a partir de carbón quedarían repartidos entre todos los productores que utilizan carbón y los consumidores finales.

Si las centrales de carbón tradicionales que se encuentran en fase de anteproyecto terminan por construirse según lo previsto, las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico superarán las 450 ppmv. Con todo, se podrían atender las necesidades mundiales de energía y estabilizar el CO_2 en 450 ppmv potenciando el uso eficiente de la energía, la dependencia de recursos energéticos renovables y, en el caso de las nuevas inversiones en carbón que se están realizando, la implantación de técnicas de captura y almacenaje geológico del CO_2.

Aunque el "carbón limpio" no existe, sí puede y debe hacerse mucho más para reducir los riesgos y la degradación ambiental que conllevan la extracción y empleo del carbón. Una estrategia integral de reducción de carbono que incorpore la captura y almacenaje de carbono reconciliaría el importante consumo de carbón previsible en los decenios venideros con el imperativo de evitar cambios de auténtica catástrofe en el clima de la Tierra.

Los autores

David G. Hawkins dirige el Centro del Clima en el Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales (NRDC, "Natural Resources Defense Council"). Se dedica al estudio del aire, la energía y el clima. **Daniel A. Lashof** es director científico del Centro del Clima del NRDC. **Robert H. Williams** desarrolla su labor investigadora en la Universidad de Princeton, donde encabeza un grupo de análisis de sistemas y políticas energéticas.

Bibliografía complementaria

How to Clean Coal. C. Canine en *OnEarth*. Natural Resources Defence Council, 2005.

IPCC Special Report on Carbon Capture and Storage, 2005.

Avoiding Dangerous Climate Change. Compilación de H. J. Schnellhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley y G. Yohe. Cambridge University Press, 2006.

Big Coal: The Dirty Secret behind America's Energy Future. J. Goodell, Houghton Mifflin, 2006.

Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage. J. J. Dooley, R. T. Dahowski, C. L. Davidson, M. A. Wise, N. Gupta, S. H. Kim y E. L. Malone. Technology Report from the Second Phase of the Global Energy Technology Strategy Program, 2006.

La opción

Si la energía generada en todo el mundo por reactores nucleares se triplicase, la atmósfera se ahorraría cada año mil o dos mil millones de toneladas de carbono

John M. Deutch y Ernest J. Moniz

La energía nuclear provee una sexta parte de la electricidad del mundo. Tras la hidroelectricidad (que aporta algo más de un sexto), constituye la fuente principal de energía "libre de carbono". Sufrió una crisis de crecimiento, de la que queda indeleble recuerdo por los accidentes de Chernobyl y de Three Mile Island. Pero, en los últimos tiempos, las centrales nucleares han demostrado una fiabilidad y un rendimiento notables. Las existencias mundiales de uranio podrían alimentar el funcionamiento de un parque de reactores mucho mayor que el actual, a lo largo de sus cuarenta o cincuenta años.

Con la creciente preocupación por el calentamiento global, y la consiguiente posibilidad de que se termine por regular las emisiones de gases de invernadero, no sorprende que gobiernos y compañías eléctricas piensen cada vez más en la construcción de más centrales nucleares. La generación de la misma cantidad de energía con combustibles fósiles tendría sus problemas. El gas

RESUMEN

- Se prevé que el consumo mundial de electricidad haya aumentado un 160 por ciento para el año 2050.
- La construcción de centenares de centrales nucleares podría cubrir el crecimiento de la demanda sin grandes nuevas emisiones de dióxido de carbono.
- Para que pueda llevarse a cabo hay que abaratar la edificación de las centrales, elaborar un plan de almacenamiento de residuos y evitar la proliferación de armas nucleares.



1. LOS GOBIERNOS Y LAS COMPAÑIAS ELECTRICAS piensan en una nueva tanda de construcciones de centrales nucleares que contribuirían a satisfacer la creciente demanda de electricidad.

KENN BROWN

NUCLEAR



natural resulta atractivo si se quieren limitar las emisiones carbónicas porque tiene un contenido de carbono más bajo que el de otros combustibles fósiles, y las plantas correspondientes requieren una inversión inferior. Pero el coste de la electricidad producida es muy sensible al precio del gas natural, que se ha vuelto más variable en estos últimos años. Aunque los precios del carbón resultan más bajos y estables, no hay fuente de electricidad que emita más carbono por watt. Para que la generación de electricidad mediante carbón pueda expandirse sin que suponga la emisión de cantidades inaceptables de carbono a la atmósfera, habría que demostrar la viabilidad de la captura y secuestro del dióxido de carbono en las centrales de carbón e implantar ese procedimiento a gran escala. Sin embargo, así aumentarían los costes.

Estas dificultades despiertan dudas acerca de las inversiones en nuevas plantas de gas o de carbón y apuntan a un posible renacimiento nuclear. Desde el año 2000, se han conectado a las redes eléctricas más de 20.000 megawatt de capacidad nuclear, sobre todo en Extremo Oriente. Con todo, y a pesar del interés evidente de los principales operadores nucleares, no se ha vuelto a proyectar ninguna central nuclear en los EE.UU. La construcción de nuevas nucleares tropieza con la elevada inversión necesaria y la incertidumbre en torno a la gestión de los residuos nucleares. Además, preocupa que la expansión global de la energía nuclear favorezca el deseo de ciertas naciones de contar con armas nucleares.

En el año 2003 codirigimos un estudio del Instituto de Tecnología de Massachusetts, *El futuro de la energía nuclear*, que analizaba las condiciones requeridas para que la opción nuclear se mantuviese viva. En él se describía una situación en la que la energía nuclear se triplicaba para el año 2050, hasta generar un millón de megawatt; le ahorraba así al mundo entre 800 y 1800 millones de toneladas de carbono emitido al año, dependiendo de que las centrales nucleares sustituyesen a centrales de gas o de carbón. A esa escala, la energía nuclear contribuiría a la estabilización de las emisiones de gases de invernadero, para la que se necesita que se dejen de emitir anualmente, a la altura de 2050, alrededor de siete mil millones de toneladas de carbono.

El ciclo del combustible

Si la energía nuclear se expande de esa suerte, ¿qué clase de centrales atómicas deberían construirse? Una cuestión clave concierne al ciclo del combustible. Puede éste ser abierto o cerrado. En un ciclo de combustible abierto, o ciclo de un solo paso, el uranio "se quema" una sola vez en un reactor, tras lo cual el combustible gastado se almacena en minas o depósitos subterráneos. El combustible gastado incluye plutonio, que podría extraerse químicamente y convertirse de nuevo en combustible para otra central nuclear. Esto da lugar a un ciclo de combustible cerrado, por el cual abogan algunos [*véase* "Residuos nucleares", por William H. Hannum, Gerald E. Marsh y George S. Stanford; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2006].

Ciertos países, sobre todo Francia, utilizan un ciclo de combustible cerrado que separa del combustible gastado el plutonio y lo lleva de nuevo a los reactores, incluido en una mezcla de óxidos de plutonio y de uranio. A más largo plazo, cabe pensar en reciclar todos los transuránidos (el plutonio entre ellos) en un reactor de los llamados rápidos (es decir, donde no se modera la velocidad de los neutrones). De ese modo, se eliminarían casi todos los componentes de vida media muy larga presentes en los residuos. El debate acerca de los residuos nucleares tomaría un cariz completamente diferente. Sin embargo, se necesita mucha investigación para resolver los espinosos problemas técnicos y económicos de semejante planteamiento.

Podría parecer que el reciclaje de los residuos tiene todas las ventajas: se utiliza menos materia prima para la misma energía total producida y se atempera el problema del almacenamiento de larga duración de los residuos, pues sería menor la cantidad de material radiactivo que habría que guardar durante miles de años.

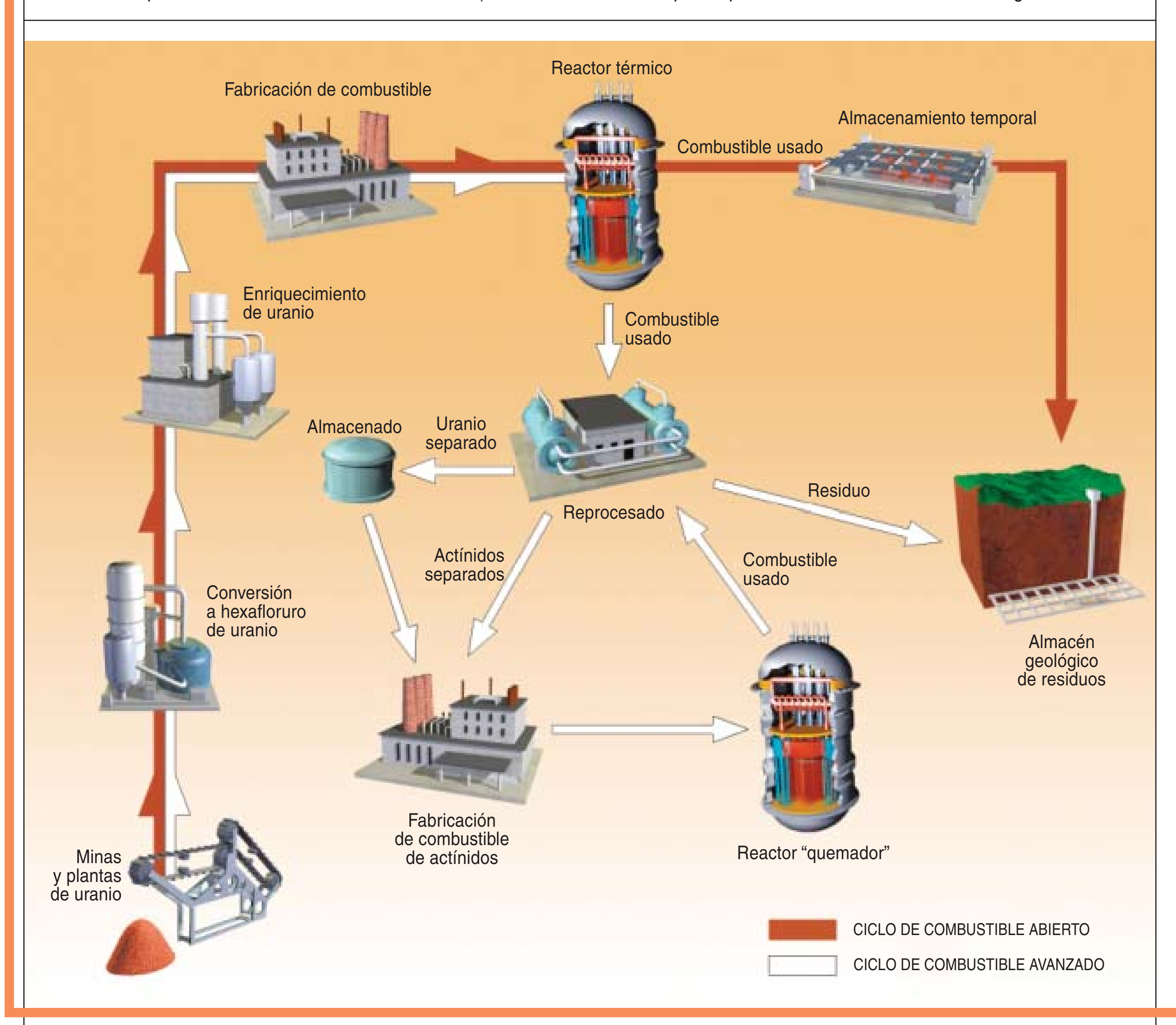
No obstante, creemos que en las próximas décadas habrá de preferirse el ciclo abierto. En primer lugar, el combustible reciclado es más costoso que el uranio original. En segundo, parece haber uranio suficiente para que el ciclo de un solo paso pueda sustentar una generación triplicada de energía nuclear a lo largo de los 40 o 50 años de vida de las centrales. En tercer lugar, la ventaja ambiental del almacenaje a largo plazo queda compensada por los riesgos ambientales a corto plazo del reprocesado y la fabricación del combustible, que son tratamientos complejos y peligrosos. Por último, el reprocesado que se efectúa en un ciclo de combustible cerrado produce plutonio que puede derivarse hacia la fabricación de armas nucleares.

El tipo de reactor que se seguirá prefiriendo durante los próximos veinte años, o más, es aquél en el que se refrigera y modera los neutrones con agua ligera (agua ordinaria, en vez de agua pesada, que contiene deuterio). La inmensa mayoría de las centrales actuales pertenecen a esta clase; se trata de una técnica madura, bien conocida.

Los diseños de los reactores se dividen en generaciones. Los primeros prototipos de reactores, construidos en los años cincuenta y principios de los sesenta, constituían, a menudo, piezas únicas. Los reactores de la generación II, en cambio, se construyeron en gran número, desde finales de los años sesenta hasta principios de los noventa, para su explotación comercial. Los reactores de la generación III incorporan diversas mejoras en el combustible y la seguridad pasiva: en caso de un accidente, el reactor se apagaría solo, sin que tuviesen que intervenir los técnicos. El primer reactor de la generación III se construyó en Japón en 1996. Entre los reactores de la generación IV, hoy en estudio, se cuentan los modelos de combustible granulado y los reactores rápidos enfriados por plomo [*véase* "Nueva generación de la energía nuclear", por James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2002]. Los reactores de la generación III+ se asemejan a los de la generación III, aunque incorporan técnica más avanzada. Con la posible excepción de los reactores de gas de alta temperatura (así, el de combustible granulado), no cabe esperar la explotación comercial de reactores de cuarta generación hasta dentro

CICLOS DE COMBUSTIBLE PREFERIDOS

Los autores prefieren un ciclo de combustible abierto para los próximos decenios. En su decurso, el uranio se "quema" sólo una vez en un reactor térmico (es decir, de neutrones cuya velocidad se ha moderado) y el combustible ya gastado se almacena en un depósito de residuos (*trayectoria en rojo*). Algunos países utilizan un ciclo cerrado, en el cual se extrae el plutonio del combustible gastado y se mezcla con uranio para reutilizarlo en un reactor térmico (*no se muestra*). En un futuro lejano quizá sea factible, y preferible, un ciclo cerrado avanzado (*trayectoria en blanco*): el plutonio y otros elementos (actínidos), y quizás el uranio, del combustible gastado se reprocesarían y utilizarían en reactores "quemadores" (reactores que no contienen apenas material que pueda convertirse durante su funcionamiento en material fisionable); así se reduciría drásticamente la cantidad de residuos que requieren un almacenamiento de larga duración.



DON FOLEY

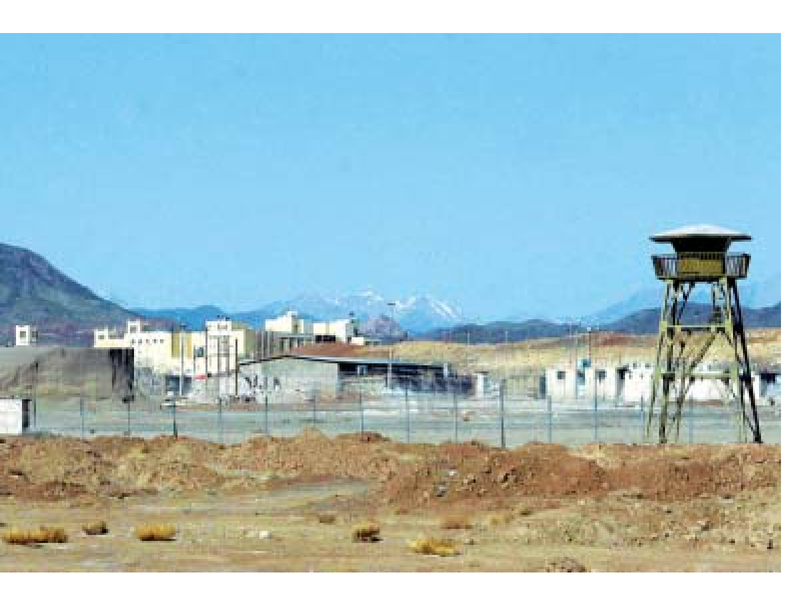
de decenas de años. Para evaluar nuestro panorama del año 2050, supusimos que se construían reactores de agua ligera de la generación III+.

Con el reactor modular de combustible granulado cabe pensar en centrales nucleares modulares. Una posibilidad interesante. En vez de construir grandes plantas de 1000 megawatt, podría disponerse de módulos de unos 100 megawatt. Este enfoque vendría muy bien en países en vías de desarrollo y en países industrializados sin regulaciones, por la sencilla razón de que la inversión es mucho menor. Las grandes centrales tradicionales tienen la ventaja de la economía de escala, que da por resultado un costo más bajo por kilowatt; sin embargo, perderían esa ventaja si los módulos se construyesen en gran cantidad con los métodos eficientes de una producción industrial.

Sudáfrica se propone iniciar la construcción de una planta de prueba de combustible granular, con una potencia de 110 megawatt, en 2007. Debería terminarse en 2011. Para 2013 se planean módulos comerciales de cerca de 165 megawatt, con la esperanza de venderlos en Africa, sobre todo.

Reducción de costes

Según enseña la experiencia, la electricidad de una nueva central de energía nuclear sería hoy más costosa que la de una planta nueva de carbón o de gas. El estudio de 2003 del Instituto de Tecnología de Massachusetts, antes aludido, calculaba que los nuevos reactores de agua ligera producirían electricidad a un coste de 6,7 centavos de dólar por kilowatt-hora (determinado conforme a las condiciones económicas de EE.UU.). Esa cifra comprende todos los costes de una planta, repartidos a lo largo de su vida útil, incluido un beneficio aceptable para los inversores. Bajo hipótesis equivalentes, estimamos que una nueva central de carbón produciría electricidad a un coste de 4,2 centavos por kilowatt-hora. En el caso de una central nueva de gas, el coste, muy sensible al precio del gas natural, sería de unos 5,8 centavos por kilowatt-hora para un precio elevado del gas.



2. ESTA PLANTA de enriquecimiento de uranio de Natanz, Irán, viene preocupando últimamente, ya que podría utilizarse para fabricar uranio apto para armamento. Un acuerdo internacional por el cual los países "consumidores" alquilaran el combustible a los países "suministradores", los EE.UU. por ejemplo, en vez de construir sus propias plantas de enriquecimiento, aliviaría la inquietud por una posible proliferación del armamento nuclear.

GETTY IMAGES

Habrá quienes duden de que se pueda evaluar el coste de la energía nuclear. Recordarán el exagerado optimismo que hubo en un principio, cuando se decía que sería "demasiado barata para medirla". Pero el análisis del MIT se basa en la experiencia acumulada y en el funcionamiento real de las plantas existentes, no en las promesas de la industria nuclear. Algunos se preguntarán también por las incertidumbres inherentes a tales proyecciones. Pero las estimaciones colocan las tres alternativas —energía nuclear, de carbón y de gas— en un mismo campo de juego y no hay ninguna razón para esperar que las contingencias inesperadas favorezcan a una u otra. Además, cuando las compañías eléctricas deciden qué clase de central energética van a construir, basan sus decisiones en ese tipo de estimaciones.

Se podrían dar varios pasos para reducir el coste de la opción nuclear por debajo de nuestra cifra básica de 6,7 centavos por kilowatt-hora. Una recorte del 25 por ciento en los gastos de construcción bajaría el coste de la electricidad a 5,5 centavos por kilowatt-hora. Acortando el tiempo de construcción de una planta de cinco a cuatro años y mejorando el funcionamiento y el mantenimiento, podrían ahorrarse unos 0,4 centavos más por kilowatt-hora. La financiación de una central depende de las regulaciones que afectan a su establecimiento. Reducir los costes de capital de una central nuclear hasta igualarlos a los de una planta de gas o de carbón eliminaría la diferencia con el carbón (que cuesta 4,2 centavos por kilowatt-hora). Aunque estas eventuales reducciones en el coste de la energía nuclear resultan verosímiles —en especial si se construye un número importante de unidades a partir de unos pocos diseños comunes—, no está demostrado que puedan llevarse a cabo.

La energía nuclear se convierte en la preferible desde un punto de vista económico cuando se pone un precio a las emisiones de carbono. Llamaremos "impuesto del carbono" a esa medida, hecha la cautela de que no toda asignación de un precio significa establecimiento de un impuesto.

En Europa, los permisos para emitir carbono se negocian en un mercado abierto. A comienzos de 2006, se vendían a más de 20 euros por tonelada de dióxido de carbono, aunque su precio ha caído ahora y se halla en torno a la mitad. Un impuesto de sólo 50 dólares por tonelada de carbono sube el precio de la electricidad generada por carbón a 5,4 centavos por kilowatt-hora. A 200 dólares por tonelada de carbono sería ya muy alto, 9,0 centavos por kilowatt-hora. La electricidad generada con gas no subiría tanto: quedaría en 7,9 centavos por kilowatt-hora. Las plantas de combustible fósil escaparían de las tasas que gravasen las emisiones si secuestraran y confinasen el carbono, pero el coste de esta operación repercutiría en el precio como un impuesto.

Debido a que han pasado muchos años desde que se iniciara la última construcción de una planta nuclear en los EE.UU., las compañías que levanten las próximas centrales nucleares se enfrentarán a costos adicionales que ya no existirán en obras subsiguientes; tendrán, además, que superar los escollos de una tramitación de los permisos de nuevo cuño. Para superar ese obstáculo, la Ley de Política Energética de 2005 incluyó algunas provisiones importantes, como un incentivo fiscal de 1,8 centavos por kilowatt-hora en favor de las nuevas centrales nucleares durante sus primeros ocho años de funcionamiento. Esa rebaja, o "incentivos a primeros", se aplica a los primeros 6000 megawatt de las nuevas centrales. Se han formado varios consorcios para aprovechar tales ventajas fiscales.

Gestión de residuos

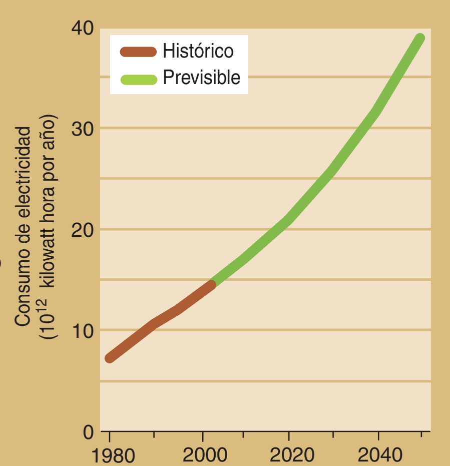
El segundo gran obstáculo al que se enfrenta un renacimiento nuclear es la gestión de los residuos. Ningún país tiene a punto todavía un sistema que almacene permanentemente el combustible gastado y demás residuos radiactivos de las centrales nucleares. Se suele preferir el almacenamiento geológico: guardar los resi-

HACIA EL FUTURO

La demanda mundial de electricidad aumentará mucho en los próximos decenios (*abajo*). Para atender esa demanda, se deberán construir miles de centrales de energía nuevas. Uno de los factores de más peso a la hora de determinar su naturaleza será el coste estimado de la electricidad producida (*derecha*). No se construirán muchas centrales nucleares si no resultan competitivas con las plantas de carbón y gas. Si se logra que las centrales nucleares resulten competitivas, la producción mundial de energía nuclear se podría triplicar —con respecto a la del año 2000— para el 2050, según un estudio del MIT (*abajo*).

EL CONSUMO DE ELECTRICIDAD

Se prevé que el consumo mundial de electricidad haya aumentado en un 160 por ciento para el año 2050. La proyección (*verde*) utiliza las estimaciones demográficas de las Naciones Unidas y supone que el consumo per cápita aumentará cerca del 1 por ciento anual en los países desarrollados. Se suponen índices más altos de aumento para los países en vías de desarrollo, mientras alcanzan los niveles de uso del mundo desarrollado.



LOS PRECIOS

Línea básica
IMPUESTO SOBRE EL CARBONO
200 dólares por tonelada
100 dólares por tonelada
50 dólares por tonelada
Coste (centavos por kilowatt hora)
10
8
6
4
2
0
Ahorros plausibles
Nuclear
Carbón
Gas
Gas barato

El coste de la electricidad previsto para las nuevas centrales de energía depende de muchos factores. Los impuestos sobre las emisiones de carbono podrían aumentar los costos de las de carbón y gas. Los de las nucleares podrían conocer reducciones gracias a mejoras verosímiles, pero no probadas.

¿QUIEN TENDRA LA ENERGIA?

La situación hipotética descrita por el estudio del MIT prevé que EE.UU. producirá alrededor de una tercera parte del millón de megawatt de electricidad que se obtendrían de la energía nuclear en el año 2050; el resto del mundo desarrollado produciría otro tercio.

CAPACIDAD DE GENERACION, 2050
EE.UU.
Europa y Canadá
Asia Oriental desarrollada
Antigua Unión Soviética
China, India y Pakistán
Indonesia, Brasil y México
Otros países en vías de desarrollo



▲ En construcción: una planta de energía nuclear avanzada (generación III+), de 1600-megawatt, en Olkiluoto, Finlandia.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION Y ERNEST J. MONIZ (*consumo de electricidad*); "THE FUTURE OF NUCLEAR POWER", POR STEPHEN ANSOLABEHERE ET AL., INSTITUTO TECNOLOGICO DE MASSACHUSETTS, 2003 (*coste de la electricidad y capacidad de generación*); AREVA (*fotografía*)

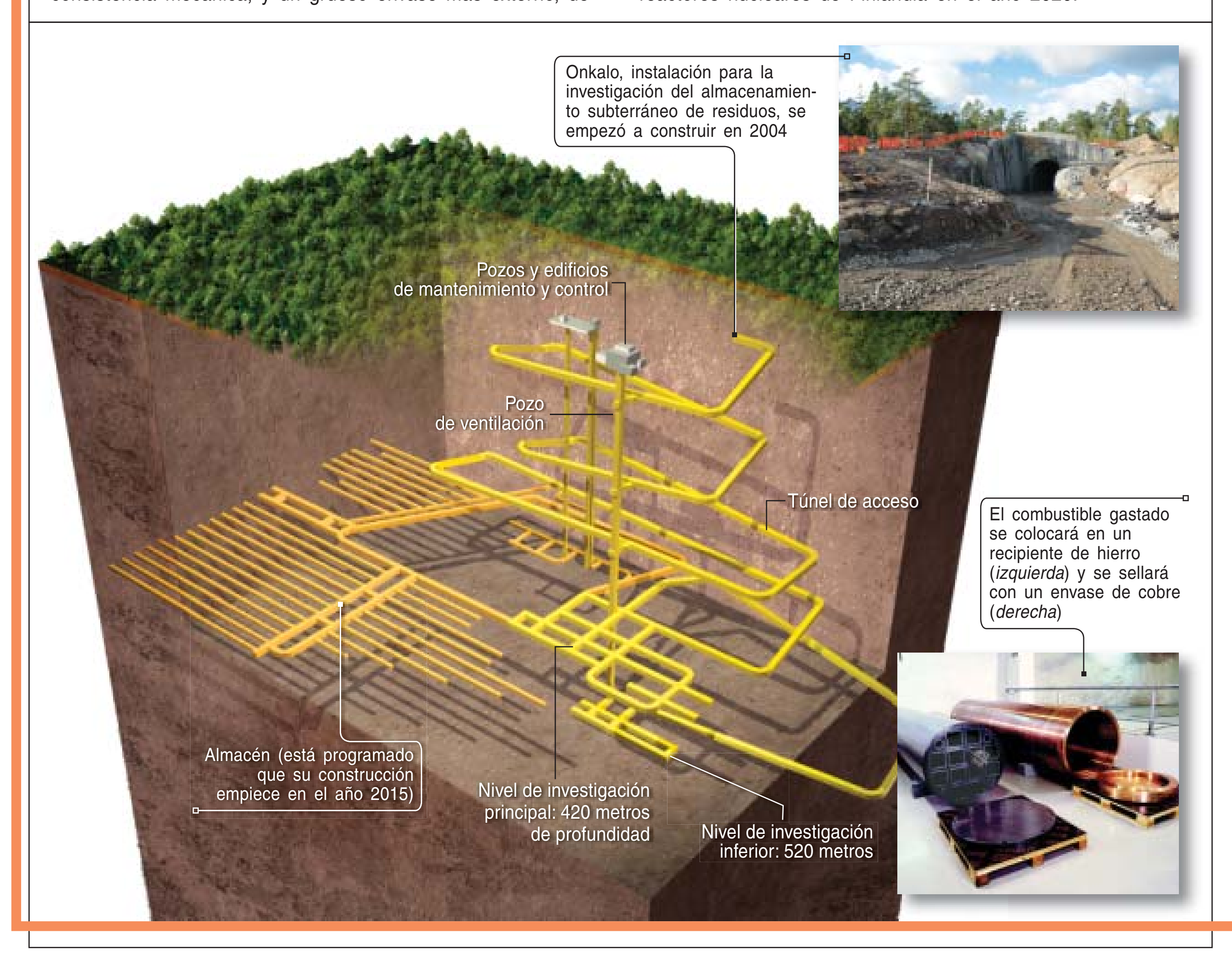
duos en cámaras excavadas centenares de metros bajo tierra. Hay que prevenir las fugas de residuos durante muchos milenios; se combinan barreras de diferente tipo, tanto construidas (por ejemplo, los recipientes de los residuos) como geológicas (la estructura natural de la roca donde se ha excavado el compartimiento y las características de la cuenca hidrogeológica). Muchos años de estudio apoyan el almacenamiento geológico. Se conocen bien los procesos y acontecimientos que podrían transportar los radionúclidos desde el depósito hacia la biosfera. A pesar de esta fiabilidad científica, la aprobación de un depósito geológico sigue estando cargada de dificultades.

El almacén geológico por excelencia es la instalación propuesta en el monte Yucca, en Nevada, de la que se viene hablando desde hace más de veinte años. Hace poco se encontró que contenía bastante más agua que la supuesta. La aprobación de ese depósito por la Comisión Reguladora Nuclear sigue en el aire.

El retraso en encontrar una manera de retirar definitivamente los residuos (aunque se apruebe su uso, es poco probable que el almacén del monte Yucca acepte residuos antes de 2015) quizá lastre la construcción de nuevas centrales nucleares. Por ley, el gobierno de Estados Unidos debería haber empezado antes de 1998 a trasladar el combustible, ya gastado, de los reactores a un depósito final. Que no se haya hecho así ha obligado a almacenar mayores cantidades en muchos lugares, con el consiguiente descontento de vecinos, ciudades y estados.

ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES

Finlandia se dispone a abordar el almacenamiento subterráneo de residuos nucleares en Olkiluoto. Según el plan, las barras de combustible gastadas se encapsularán en grandes recipientes con una parte interna de hierro, para darles consistencia mecánica, y un grueso envase más externo, de cobre, para resistir a la corrosión. Se los colocará en agujeros excavados en el suelo del túnel y rodeará de yeso, a fin de prevenir el flujo directo de agua a los recipientes. Esta instalación podría empezar a aceptar residuos de los cuatro reactores nucleares de Finlandia en el año 2020.



DON FOLEY; FUENTE: POSIVA; CORTESIA DE POSIVA (*fotografías*)

Finlandia podría ser el primer país que construya un almacén para sus residuos nucleares de alto nivel. En Olkiluoto, donde se encuentran dos reactores nucleares, ha comenzado la excavación de Onkalo, una instalación subterránea de investigación. Se extiende bajo tierra a lo largo de medio kilómetro; servirá para estudiar la estructura rocosa y los flujos de agua subterránea, y poner a prueba la técnica de almacenamiento en esas condiciones subterráneas. Si todo va según los planes y se obtienen las licencias gubernamentales necesarias, los primeros recipientes de residuos podrían colocarse allí en 2020. Hacia 2130 el depósito estaría completo; las rutas de acceso se rellenarían y sellarían. El dinero para pagar la instalación se ha venido cargando en el precio de la energía nuclear finlandesa desde finales de los años setenta.

Para abordar en Estados Unidos el problema de la gestión de residuos, el gobierno debería adjudicarse el combustible gastado que ahora se almacena en las centrales repartidas por el país y juntar todas las remesas en uno o más sitios federales de almacenaje interino hasta que se disponga de una instalación permanente. Los residuos pueden almacenarse con garantías durante un período largo. Este almacenaje transitorio, que debería prolongarse incluso durante 100 años, tendría que formar parte de la gestión de los residuos: quitaría presión al gobierno y a la industria, que así no se verían forzados a buscar una solución precipitada.

Mientras tanto, el Departamento de Energía no debe abandonar el monte Yucca. Muy el contrario: debe valorar de nuevo la conveniencia del sitio bajo diversas circunstancias y modificar el calendario del proyecto según sea necesario. Si la energía nuclear se amplía en todo el mundo hasta un millón de megawatt, se generarán tantos residuos de alto nivel y combustible gastado en el ciclo de combustible de un solo paso como para llenar

una instalación del tamaño del depósito del monte Yucca cada tres años y medio. Para la opinión pública, se trata de una razón de peso en contra de la extensión de la energía nuclear, pero éste es un problema que puede y debe solucionarse.

La amenaza de la proliferación

Aparte de los programas nacionales de gestión de los residuos, tendrían que continuar los esfuerzos diplomáticos para crear un sistema internacional de países suministradores y países consumidores de combustible, en el que los países suministradores, como EE.UU., Rusia, Francia y el Reino Unido, venderían combustible nuevo a países consumidores, con programas nucleares más pequeños, y se comprometerían a retirarles el combustible gastado. A su vez, los países consumidores renunciarían a la construcción de instalaciones productoras de combustible. Esa transacción coartaría la proliferación de armas nucleares. No son las centrales nucleares las que posibilitan la proliferación, sino las plantas de enriquecimiento y de reprocesado del combustible.

La situación actual, con el programa de enriquecimiento de uranio de Irán, es un ejemplo típico. Al no fabricar combustible los países consumidores, habría que arrendárselo, si se quiere que la energía nuclear se triplique en el mundo: semejante extensión implicaría inevitablemente la existencia de centrales nucleares en algunos países donde otros temerían que se fabricasen armas nucleares.

Si se quiere que este sistema funcione, la producción del combustible debería carecer de interés económico para un programa nuclear restringido. El mundo se divide ya en países suministradores y consumidores. Instituir el reparto de papeles entre productores y sólo consumidores formalizaría la situación actual —pero no debe pensarse que sería sencillo—, de modo que se le diese permanencia con nuevos acuerdos que refuercen las realidades comerciales existentes.

Aunque el régimen propuesto es atractivo por naturaleza para las naciones usuarias, ya que con él conseguirían un suministro fiable de combustible barato sin tener que ocuparse de los residuos, habría que atender además a otros incentivos. Al fin y al cabo, los estados usuarios aceptarían así limitaciones que irían más allá del tratado de no proliferación nuclear. Por ejemplo, si se instituyese un sistema mundial de permisos negociables de emisión de carbono, a las naciones usuarias que se adhirieran a las reglas del "alquiler" del combustible se les podrían conceder permisos por sus nuevas centrales nucleares.

Irán es hoy el ejemplo más obvio de una nación a la que muchos preferirían ver como consumidora antes que como productora de uranio enriquecido. Pero no constituye un caso único. Otra nación cuyo programa debe abordarse pronto es Brasil, porque allí está en construcción una gran instalación de enriquecimiento que, supuestamente, ha de proporcionar el combustible para los dos reactores nucleares del país. Abordar la situación de Irán y Brasil conforme a unos mismos criterios es necesario para que la energía nuclear pueda expandirse, sin exacerbar el riesgo de una proliferación de armas nucleares.

El terawatt futuro

Un terawatt, un millón de megawatt, de energía "libre de carbono" contribuiría significativamente a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono previstas para mediados de siglo. Según el término acuñado por Socolow y Pacala, aportaría una o dos de las siete "cuñas" requeridas para la estabilización de las emisiones. Alcanzar un terawatt de energía nuclear hacia el año 2050 presenta una dificultad formidable. Habría que instalar cerca de 2000 megawatt al mes (unas dos centrales grandes) e invertir dos billones de dólares a lo largo de varias décadas. En los próximos diez años habría que empeñarse enérgicamente en reducir los costes de las centrales de energía, hacerse cargo de los residuos nucleares e instaurar un ciclo de combustible internacional que no fomentase la proliferación del armamento nuclear. Un factor decisivo será el grado en que se tase el dióxido de carbono emitido por los combustibles fósiles, en el mundo industrializado y en las grandes economías emergentes, como China, India y Brasil.

Pero el económico no es el único factor del que dependerá el uso futuro de la energía nuclear. La aceptación pública dependerá de la seguridad y la solución dada a los residuos nucleares. El futuro de la energía nuclear en los EE.UU. y en buena parte de Europa sigue siendo incierto. Con respecto a la seguridad, es esencial que las regulaciones de la Comisión Nacional de la Energía se hagan cumplir diligentemente.

En el panorama descrito por el estudio del MIT, los Estados Unidos triplican su potencia nuclear civil instalada, hasta los 300.000 megawatt, para que se alcance el terawatt mundial. La suerte de este futuro hipotético quedará echada en la próxima década. Dependerá de en qué medida se ejecuten los "incentivos a primeros" de la Ley de Política Energética de 2005, se empiece a retirar el combustible gastado de sus almacenes provisionales y se adopte una política que de verdad limite las emisiones de dióxido de carbono.

Los autores

John M. Deutch y **Ernest J. Moniz** fueron copresidentes del estudio que el Instituto Tecnológico de Massachusetts publicó en 2003 con el título de *El futuro de la energía nuclear*. Deutch, profesor de química del MIT, fue vicesecretario de defensa de EE.UU. entre 1994 y 1995 y director de la CIA entre 1995 y 1996. Moniz enseña física en el MIT. Entre 1995 y 1997 fue director asociado para la ciencia de la Oficina de Política de Ciencia y Tecnología, y de 1997 a 2001 subsecretario de energía.

Bibliografía complementaria

THE FUTURE OF NUCLEAR POWER. Stephen Ansolabehere et al., Massachusetts Institute of Technology, 2003.

MAKING THE WORLD SAFE FOR NUCLEAR ENERGY. John Deutch, Arnold Kanter, Ernest Moniz y Daniel Poneman en *Survival*, vol. 46, n.º 4, págs. 65-79; diciembre, 2004.

Auge de las energías *renovables*

RESUMEN

■ Las fuentes renovables de energía podrían convertirse, merced a los avances técnicos, en grandes proveedoras de la energía mundial dentro de poco.
■ Para acelerar la transición energética, debería multiplicarse el gasto en investigación y desarrollo.
■ Asimismo, debería imponerse una tasa sobre el carbón, que recompensara a las fuentes energéticas limpias y penalizara a las que atentan contra el entorno.

Las células fotovoltaicas, los aerogeneradores y los biocombustibles están a punto de convertirse en fuentes importantes de energía. Con medidas adecuadas se aceleraría ese salto

Daniel M. Kammen



KENN BROWN

Ningún plan de reducción sustancial de las emisiones con efecto invernadero tendrá éxito si se funda sólo en el aumento de la eficiencia energética. Dado que el crecimiento económico continúa multiplicando la demanda de energía —más carbón para dar electricidad a nuevas fábricas, más petróleo para nuevos vehículos, más gas natural para la calefacción de nuevos hogares—, las emisiones de carbono seguirán en línea ascendente a pesar de la introducción de vehículos, edificios y equipos que alcancen mayor rendimiento energético. Para oponerse a la alarmante tendencia hacia el calentamiento planetario, los EE.UU. y otros países deben adquirir un compromiso firme para el desarrollo de energías renovables que apenas generen dióxido de carbono.

Las técnicas de aprovechamiento de energías renovables conocieron una fama efímera hace unos 30 años, con los embargos de petróleo de los años setenta; pero el interés y el apoyo necesarios no tuvieron continuidad. Sin embargo, en los últimos años se están logrando progresos impresionantes en el rendimiento y precio de los paneles fotovoltaicos, los generadores eólicos y los biocombustibles (etanol y otros combustibles derivados de la masa vegetal). Se ha abierto así el camino hacia su comercialización a gran escala.

Además de las ventajas ambientales, las fuentes renovables prometen recortar la dependencia energética de unos países respecto de otros, al reducir la necesidad de importar combustibles fósiles. Añádase que los precios elevados y fluctuantes del petróleo y del gas natural han conferido mayor atractivo, si cabe, a las energías renovables.

1. EN UN MUNDO DE ENERGIAS LIMPIAS la electricidad se generaría mediante aerogeneradores y células fotovoltaicas; biocombustibles derivados de plantas leñosas se aplicarían a la automoción.



La época en que nos encontramos ofrece a las energías renovables oportunidades sin precedente. Este es el momento ideal para hacer avanzar la energía limpia en los próximos decenios. Pero tal empresa exigirá una inversión a largo plazo de recursos científicos, económicos y políticos. Los gobiernos y los ciudadanos han de reclamar medidas concretas y apremiar unos a otros para acelerar la transición.

Energía solar

Los paneles solares, o más correctamente, las células fotovoltaicas, se valen de materiales semiconductores para convertir la luz solar en energía eléctrica. Por el momento suministran sólo una minúscula porción de la electricidad: su capacidad generadora total en el planeta es de 5000 megawatt, lo que apenas representa un 0,15 por ciento de la capacidad de generación de todas las fuentes. Sin embargo, la luz solar podría llegar a suministrar 5000 veces la energía que hoy se consume en el mundo. Merced a los avances técnicos, descenso de los precios y legislación favorable en numerosos países, la producción anual de paneles fotovoltaicos se ha venido incrementando a razón de un 25 por ciento anual durante los diez últimos años, con un notable salto del 45 por ciento en 2005. Las fotocélulas fabricadas en 2005 aportaron 1727 megawatt a la capacidad generatriz mundial, con 833 megawatt en Japón, 353 en Alemania y 153 en EE.UU.

Los paneles solares se fabrican ahora de materiales muy dispares, desde las clásicas obleas de silicio policristalino, todavía dominantes en el mercado, hasta células de película delgada de silicio y dispositivos compuestos de semiconductores plásticos u orgánicos. Las fotocélulas de película delgada, aunque más baratas de fabricar que las de silicio cristalino, obtienen también una eficiencia menor de conversión de luz en electricidad. Las células cristalinas han alcanzado rendimientos del 30 por ciento o más en ensayos de laboratorio; las fotocélulas comerciales de este tipo hoy disponibles oscilan entre un 15 y un 20 por ciento.

El rendimiento de todos los tipos de fotocélulas ha ido aumentando de forma regular a lo largo de estos últimos años (en ensayos de laboratorio y en productos comercializados). Si se intensificara su investigación, podría aumentarse todavía más la eficiencia de los paneles solares que llegan al mercado.

Las células fotovoltaicas se caracterizan por su fácil instalación y manejo. Pueden colocarse en los tejados, en las paredes o en grandes extensiones de desiertos. Incluso cosidas a la ropa, para proporcionar energía a aparatos electrónicos portátiles. El estado de California se ha sumado a Japón y Alemania para liderar el impulso a escala planetaria de instalaciones solares; la iniciativa californiana "un millón de tejados solares" se propone haber logrado 3000 megawatt de nueva capacidad de generación hacia 2018. Si las tendencias actuales continúan, la producción de células fotovoltaicas crecería en los EE.UU. hasta 10.000 megawatt en un plazo de sólo 20 años.

El problema principal será abaratar las células fotovoltaicas, cuyos costes de fabricación resultan todavía muy caros. La electricidad que generan las fotocélulas cristalinas alcanza un precio total de 20 a 25 centavos (de dólar, de 17 a 20 céntimos de euro, al cambio actual) por kilowatt/hora, mientras que en las térmicas de carbón el kilowatt/hora cuesta entre 4 y 6 centavos, entre 5 y 7 en las térmicas de gas natural, y entre 6 y 9 en las centrales que utilizan biomasa. (El coste del kilowatt/hora en las centrales nucleares no está claro, porque no existe unanimidad en los conceptos que deben incluirse en el análisis de costes. Las estimaciones lo sitúan entre los 2 y los 12 centavos.)

Por fortuna, los precios de las células fotovoltaicas han venido bajando a lo largo de los diez últimos años, debido, sobre todo, al avance en los procesos de fabricación. En Japón, donde la capacidad de generación solar se incrementó en 290 megawatt en 2005 y exportó una cantidad mayor todavía, el coste de las células fotovoltaicas ha caído un 8 por ciento en un año; en California, donde se instalaron 50 megawatt de electricidad solar en 2005, el coste viene disminuyendo un 5 por ciento anualmente.

Llama la atención que sea Kenia la nación con mayor número de equipos de electricidad solar per cápita (aunque no ocupe el liderazgo en potencia solar total instalada). Todos los años se venden allí más de 30.000 paneles solares de tamaño moderado, que generan cada uno entre 12 y 30 watt. Con una inversión de unos 100 euros para el panel y algunos elementos necesarios, el sistema se utiliza para cargar una batería de automóvil, que luego suministra energía suficiente para alimentar, durante varias horas al día, una lámpara fluorescente o un pequeño aparato de TV en blanco y negro. Cada año se apuntan más keniatas a la energía solar que compatriotas suyos se abonan a la red eléctrica nacional.

Los paneles empleados constan, sobre todo, de fotocélulas de silicio amorfo. Aunque el rendimiento de éstas es sólo la mitad que el alcanzado por fotocélulas de silicio cristalino, su precio es al menos cuatro veces menor, por lo que resultan más apropiadas para los dos mil millones de personas sin acceso a la electricidad que hay en el mundo. Las ventas de pequeños sistemas de electricidad solar se han extendido a otros países africanos; los progresos que se logren en la fabricación de fotocélulas acelerarán la tendencia.

Las fotocélulas no son las únicas formas de aprovechamiento de la energía solar que están creciendo con celeridad. Los sistemas termosolares, que recogen la luz del Sol para generar calor, experimentan un peculiar resurgimiento. Hace mucho que tales sistemas vienen utilizándose para disponer de agua caliente en hogares y fábricas; producen también electricidad, sin necesidad de las costosas fotocélulas. En uno de sus diseños, la luz se concentra mediante espejos curvos sobre un motor Stirling, un dispositivo de alto rendimiento que contiene un fluido de trabajo circulante entre dos cámaras, una caliente y otra fría. El fluido se expande al ser calentado por la luz solar y desplaza a un émbolo, que a su vez acciona una turbina.

En otoño de 2005, Stirling Energy Systems (compañía con sede en Phoenix) anunció que proyectaba la construcción de dos grandes centrales eléctricas de energía termosolar en el sur de California. Esta empresa ha firmado un acuerdo para la venta de su producción

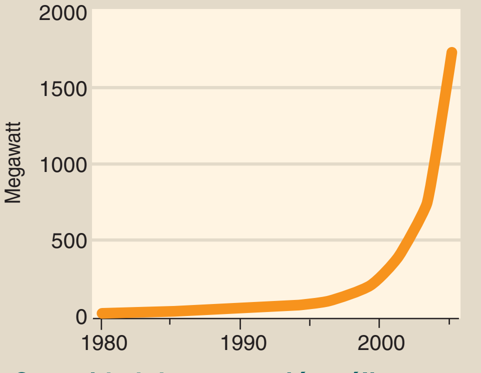
EVOLUCION DE LAS FUENTES DE ENERGIA RENOVABLE

Los paneles solares, la energía eólica y los biocombustibles están cobrando fuerza en el mercado energético. Sin embargo, siguen siendo fuentes marginales frente al carbón, el gas natural y el petróleo, combustibles fósiles todos ellos.

EL APOGEO DE LAS RENOVABLES

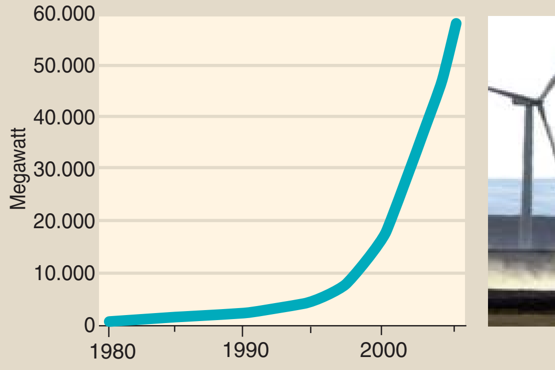
La comercialización de fuentes de energía renovable se ha acelerado de forma impresionante desde el año 2000. La producción anual de células fotovoltaicas, sumados todos los países del mundo, aumentó en un 45 por ciento en 2005. La construcción de nuevos parques eólicos en el transcurso del último decenio, sobre todo en Europa, ha decuplicado la capacidad de generación eólica. La producción de etanol, el biocombustible más común, se disparó hasta 36.500 millones de litros en 2005. En los EE.UU., la parte del león correspondió al etanol destilado de maíz cultivado.

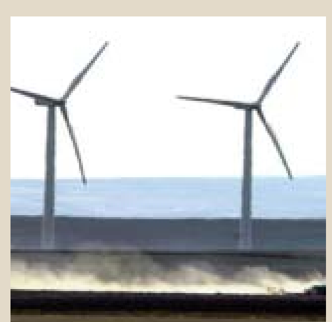
Producción fotovoltaica



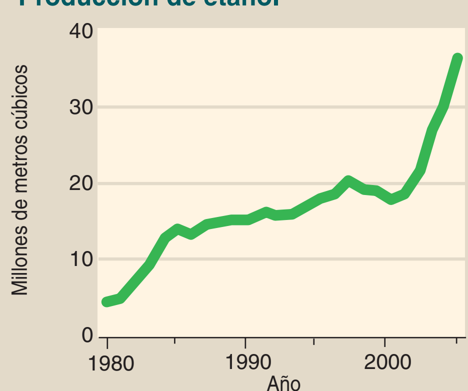


Capacidad de generación eólica





Producción de etanol



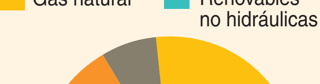


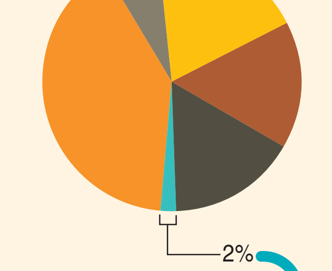
FUENTES ENERGETICAS EN COMPETENCIA

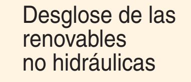
Fracción de la generación eléctrica mundial



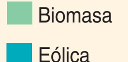


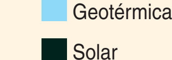


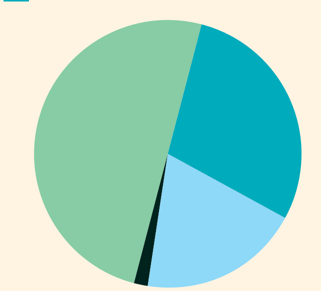




Desglose de las renovables no hidráulicas







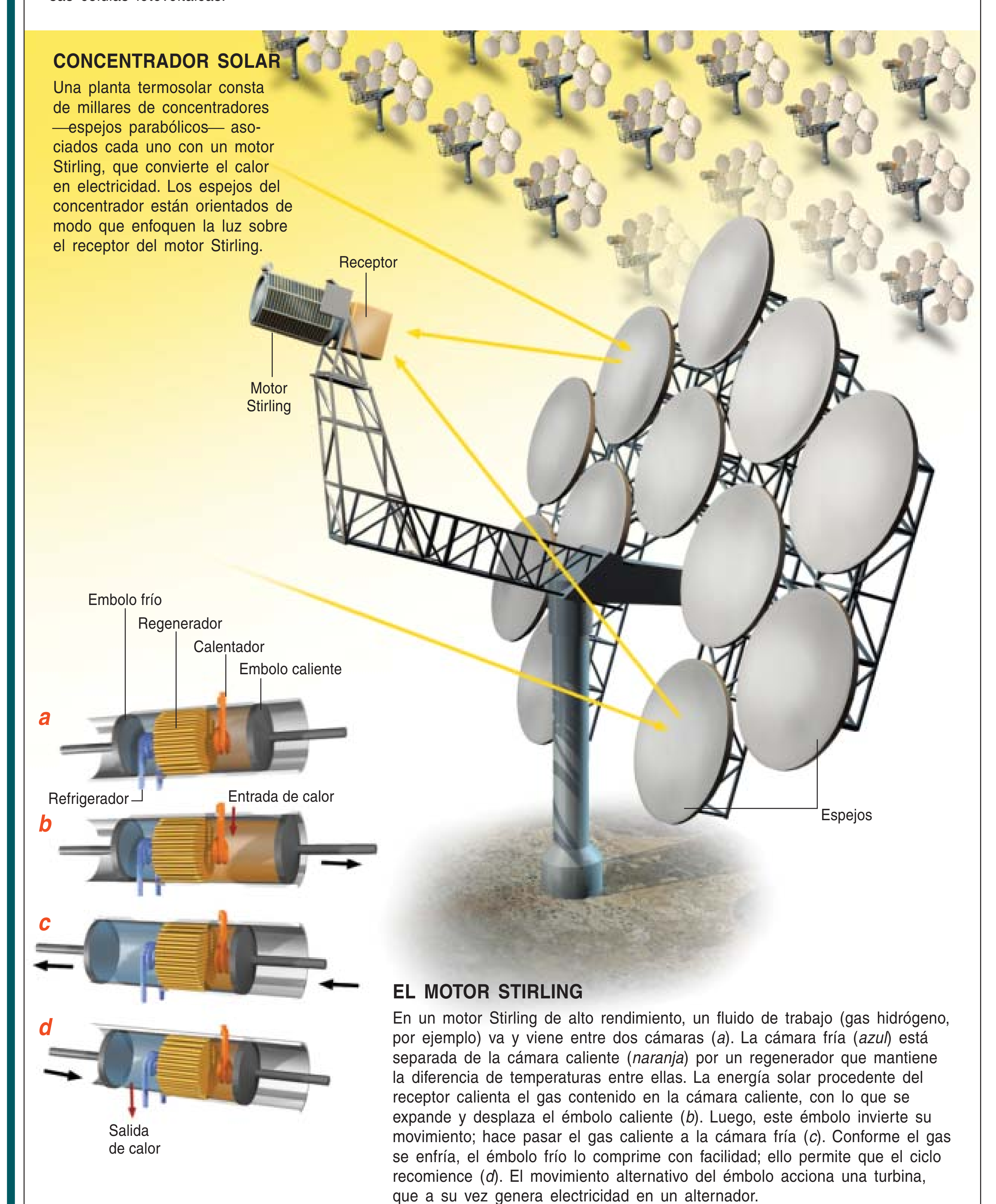
EL PROBLEMA

Las energías renovables deben superar varios obstáculos técnicos, económicos y políticos para poder disputar el mercado que hoy disfrutan los combustibles fósiles. Para competir con las térmicas de carbón, los precios de la electricidad solar han de seguir disminuyendo. Los promotores de parques eólicos deben vencer la oposición de los vecinos y los reparos de los ecologistas. Otras fuentes de energías renovables prometedoras son los generadores de electricidad por vapor geotérmico y las centrales de biomasa que operan con leña o residuos agrícolas.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: PV NEWS, BTM CONSULT, AWEA, EWEA, F. O. LICHT Y *BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY 2006*; SHARP ELECTRONICS CORPORATION (*paneles solares*); DON RYAN AP PHOTO (*aerogenerador*); DOUG WILSON *Corbis* (*maíz*)

ELECTRICIDAD TERMOSOLAR

Los sistemas termosolares, utilizados desde hace tiempo para agua caliente sanitaria en hogares y fábricas, generan también electricidad. Dado que estos sistemas producen electricidad a partir de calor, y no de luz, evitan la necesidad de las costosas células fotovoltaicas.



CONCENTRADOR SOLAR

Una planta termosolar consta de millares de concentradores —espejos parabólicos— asociados cada uno con un motor Stirling, que convierte el calor en electricidad. Los espejos del concentrador están orientados de modo que enfoquen la luz sobre el receptor del motor Stirling.

EL MOTOR STIRLING

En un motor Stirling de alto rendimiento, un fluido de trabajo (gas hidrógeno, por ejemplo) va y viene entre dos cámaras (*a*). La cámara fría (*azul*) está separada de la cámara caliente (*naranja*) por un regenerador que mantiene la diferencia de temperaturas entre ellas. La energía solar procedente del receptor calienta el gas contenido en la cámara caliente, con lo que se expande y desplaza el émbolo caliente (*b*). Luego, este émbolo invierte su movimiento; hace pasar el gas caliente a la cámara fría (*c*). Conforme el gas se enfría, el émbolo frío lo comprime con facilidad; ello permite que el ciclo recomience (*d*). El movimiento alternativo del émbolo acciona una turbina, que a su vez genera electricidad en un alternador.

DON FOLEY; FUENTE: DEPARTAMENTO DE ENERGIA DE LOS EE.UU.

eléctrica a Southern California Edison durante 20 años, que adquirirá la electricidad de una planta de 500 megawatt, que se construirá en el desierto de Mojave. Las instalaciones se extenderán sobre unas 1800 hectáreas. Contarán con 20.000 espejos curvos; cada uno concentrará la luz sobre un motor Stirling del tamaño de un barril de petróleo. Se espera que la planta entre en servicio en 2009; posteriormente se ampliará a 850 megawatt. Stirling ha firmado otro contrato de 20 años con San Diego Gas & Electric para la construcción de una central de 300 megawatt y 12.000 discos reflectores en Imperial Valley. Esta instalación podría llegar a ampliarse hasta los 900 megawatt.

Los detalles financieros de estos dos proyectos californianos no han trascendido. La electricidad producida mediante las técnicas termosolares actuales cuesta entre 5 y 13 centavos de dólar por kilowatt/hora; los sistemas basados en discos reflectantes se sitúan en la zona superior de esta escala. Mas, por tratarse de proyectos respaldados por técnicas muy fiables y asentados sobre una producción industrial, cabe presumir que los costes finales terminen en el intervalo de 4 a 6 centavos por kilowatt/hora, un precio competitivo con el de las actuales centrales térmicas de carbón.

Energía eólica

La energía eólica ha crecido a un ritmo que rivaliza con el de la industria solar. La capacidad de generación eléctrica de todos los aerogeneradores del mundo se ha incrementado más de un 25 por ciento al año, por término medio, a lo largo de los últimos diez años. En 2005 alcanzó casi los 60.000 megawatt. Su crecimiento en Europa ha sido explosivo: entre 1994 y 2005 la capacidad de generación eólica de los países de la Unión Europea saltó de 1700 a 40.000 megawatt. Alemania sola cuenta ya con más de 18.000 megawatt de capacidad productiva, merced a un ambicioso programa de construcción. El estado alemán de Schleswig-Holstein cubre una cuarta parte de su demanda eléctrica anual mediante más de 2400 aerogeneradores; hay meses en los que el viento suministra más de la mitad de la electricidad del *land*. España dispone de una capacidad de producción eólica de 10.000 megawatt; Dinamarca, de 3000 megawatt, y Holanda, Gran Bretaña y Portugal superan los 1000 megawatt cada una.

En los EE.UU., la industria de la energía eólica ha experimentado un despegue impresionante desde hace cinco años. Ha elevado su capacidad de generación hasta 9800 megawatt en 2005, con un aumento del 36 por ciento. Aunque las turbinas eólicas generan sólo el 0,5 por ciento de la electricidad de ese país, las perspectivas de ampliación son prometedoras, sobre todo en los estados de los Grandes Llanos, muy ventosos. (En Dakota del Norte, por ejemplo, el viento podría proporcionar más energía que en toda Alemania, pero cuenta sólo con 98 megawatt instalados.)

Si en los EE.UU. se construyeran los parques suficientes para explotar plenamente sus recursos eólicos, los aerogeneradores proporcionarían 11 billones de kilowatt/hora anuales, es decir, el triple aproximado de la producción total de energía eléctrica generada el año pasado en ese país por todas las fuentes juntas. La industria eólica ha desarrollado turbinas cada vez de mayor tamaño y mayor rendimiento, capaces de entregar entre 4 y 6 megawatt cada una. En numerosos lugares, la energía eólica constituye la forma más económica de producción de electricidad: los precios oscilan entre 4 y 7 centavos por kilowatt/hora.

La instalación de nuevos parques eólicos en los EE.UU. ha estado incentivada por una subvención federal de 1,9 céntimos por kilowatt/hora, que, a pesar de su modestia, permite que los aerogeneradores compitan con las térmicas de carbón. Pero el Congreso estadounidense ha amenazado en repetidas ocasiones con suprimir tal subvención. En lugar de instituir ayudas de larga duración para la energía eólica, el Legislativo ha ido prorrogándolas de forma anual; esa persistente incertidumbre ha frenado las inversiones en parques eólicos. El Congreso amenaza también con desautorizar un parque de 130 turbinas que se instalaría en el mar, frente a la costa de Massachussets; ofrecería una capacidad de producción de 468 megawatt, suficiente para el suministro de casi todo Cape Cod, Martha's Vineyard y Nantucket.

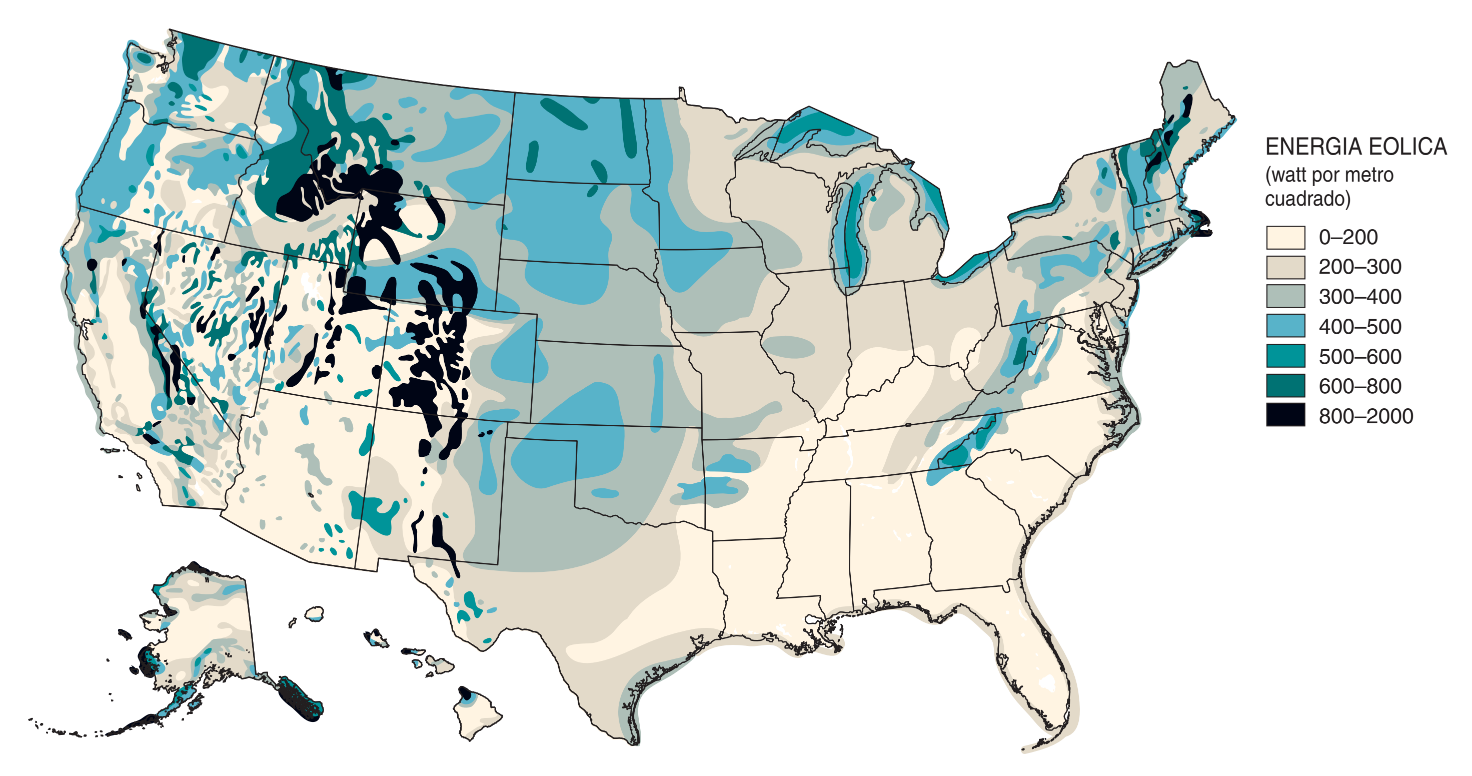
Las reticencias sobre la energía eólica provienen, por una parte, de unos servicios públicos refractarios a abrazar las técnicas novedosas y, por otra, del efecto "en mi pueblo, no". Aunque la preocupación de numerosos municipios sobre el impacto paisajístico puede merecer consideración, es preciso contraponer los costes sociales de las alternativas. Dado que las necesidades energéticas de la sociedad crecen inexorables, el rechazo a los parques eólicos entraña a menudo la construcción o ampliación de centrales de combustibles fósiles, que tendrían efectos ambientales más devastadores.

Biocombustibles

La investigación se centra también en el desarrollo de biocombustibles que pudieran reemplazar, al menos, una parte del petróleo que en la actualidad consumen los vehículos de motor. En los EE.UU., el biocombustible más común es, con mucho, el etanol; se obtiene del maíz y se mezcla después con gasolina. Los fabricantes de etanol se benefician de una partida presupuestaria importante: con la ayuda de un subsidio anual de 2000 millones de dólares, vendieron en 2005 más de 16.000 millones de litros de etanol (casi el 3 por ciento en volumen de todo el combustible de automoción); se espera que la producción aumente un 50 por ciento en 2007.

Algunos políticos han puesto en duda la conveniencia del subsidio; aducen estudios que revelan que el cultivo del maíz y el refino del etanol requieren mayor cantidad de energía que la que este combustible proporciona a los motores de combustión interna. No obstante, en un análisis reciente efectuado por el autor y su grupo, se descubrió que algunos de estos estudios no toman debidamente en cuenta el contenido energético de los subproductos que se manufacturan junto con el etanol. Si se consideran todos los ingresos y egresos, resulta que el etanol entrega una energía positiva neta de casi 5 megajoule por litro.

Más ambiguo, en cambio, resulta el impacto del etanol sobre las emisiones de gases de invernadero. Nuestras



2. LOS RECURSOS EOLICOS estadounidenses son espléndidos: podrían generar anualmente más de 11 billones de kilowatt/hora. Entre las mejores ubicaciones para los parques eólicos se cuentan los estados de los Grandes Llanos, los Grandes Lagos y las cadenas montañosas de las Rocosas y los Apalaches.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: LABORATORIO NACIONAL DE ENERGIA RENOVABLE

estimaciones indican que la sustitución de la gasolina por etanol reduce las emisiones de gases de invernadero en un 18 por ciento. Pero este análisis está afectado por importantes incertidumbres relativas a determinadas prácticas agrícolas: en concreto, el coste ambiental de los abonos químicos. Según las hipótesis que se formulen sobre tales prácticas, los resultados del cambio a etanol oscilan entre un descenso del 36 por ciento en las emisiones hasta un aumento del 29 por ciento. Aunque el etanol obtenido del maíz pueda aliviar la dependencia estadounidense de las importaciones de petróleo, probablemente no hará gran cosa para frenar el calentamiento global si la producción de biocombustible no se hace por vías menos contaminantes.

Estos cálculos cambian de forma sustancial cuando el etanol se obtiene de fuentes celulósicas, es decir, de plantas leñosas. Mientras que casi todos los fabricantes de etanol a partir de maíz recurren a combustibles fósiles para obtener el calor necesario para la fermentación, los productores de etanol celulósico calientan los azúcares de los vegetales mediante la quema de lignina (una parte no fermentable del material orgánico). La combustión de la lignina no hace una aportación neta de gases de invernadero a la atmósfera, pues sus emisiones están compensadas por el dióxido de carbono que absorbieron, durante su crecimiento, las plantas que se utilizan para fabricar el etanol. En consecuencia, la sustitución de gasolina por etanol celulósico puede cercenar las emisiones de gases de invernadero en un 90 por ciento o más.

Otro biocombustible prometedor es el gasóleo “ecológico”. Este combustible se obtiene por gasificación de biomasa —calentamiento de materiales orgánicos para provocar la liberación de hidrógeno y monóxido de carbono— y posterior conversión de tales compuestos en hidrocarburos de cadena larga, mediante el proceso Fischer-Tropsch. (Estas reacciones se utilizaron en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial para producir combustibles sintéticos para motores de combustión interna a partir de carbón.) El resultado sería un combustible líquido y económicamente competitivo, que apenas despediría gases de invernadero a la atmósfera. La compañía Royal Dutch/Shell ha empezado ya a investigar la técnica.

Investigación y desarrollo

Cada una de estas fuentes renovables se encuentra ahora a punto de inclinar la balanza hacia uno u otro lado, en esa fase crucial en la que inversiones, innovaciones y el acceso al mercado facultarían a los proveedores de estas energías atractivas, pero marginales para convertirse en grandes suministradores energéticos a escala regional y mundial. Al propio tiempo, se están consolidando en todo el mundo políticas decididas para abrir mercados a las energías renovables a escala municipal, regional y estatal.

Las razones que han llevado a los gobiernos a adoptar estas medidas son varias: promoción de la diversidad de mercados (independencia energética), estímulo de la industria y de la creación de empleo, y protección del medio a escala regional y global. En EE.UU., más de veinte estados han establecido mínimos para la fracción de electricidad que debe generarse a partir energías renovables. Alemania se propone lograr que el 20 por

HIBRIDOS RECARGABLES EN LA RED

Los beneficios ambientales de los biocombustibles renovables serían incluso mayores si se utilizaran en vehículos híbridos eléctricos recargables. Estos coches y camiones, al igual que los vehículos híbridos estándar de gasolina-electricidad, conjugan motores de combustión interna con motores eléctricos para maximizar la eficiencia del combustible. Pero los "recargables" disponen de baterías de mayor tamaño, que se pueden recargar desde la red eléctrica general. Operan de forma exclusivamente eléctrica durante recorridos cortos; en los viajes largos, el motor de combustión se pone en marcha cuando las baterías ya no disponen de energía suficiente. Esta combinación reduce drásticamente el consumo de gasolina: mientras que una berlina típica actual consume unos 8 litros cada 100 kilómetros, e híbridos como el Toyota Prius rondan en torno a los 5, los recargables logran consumos del orden de los 1,5 a 3 litros en esa distancia. El consumo de petróleo disminuiría todavía más si los motores endotérmicos de los recargables se alimentaran con biocombustibles como el E85, que contiene un 15 por ciento de gasolina y un 85 por ciento de etanol.

Si de la noche a la mañana la totalidad del parque automovilístico de los EE.UU. se reemplazara por recargables, el consumo de petróleo se reduciría en un 70 por ciento o más. Dejarían de acudir a la importación. El cambio tendría consecuencias favorables también para el frágil clima de la Tierra, por no hablar de la reducción de la contaminación atmosférica. Dado que casi toda la energía de la automoción provendría de la red eléctrica, y no de los depósitos de combustible, el impacto ambiental se concentraría en unos cuantos millares de centrales eléctricas, en vez de hallarse disperso en centenares de millones de vehículos. Este cambio centraría el problema de la protección del clima en la tarea de reducir las emisiones de gases de invernadero derivadas de la generación de electricidad.

Los vehículos recargables serían también la tabla de salvación de la renqueante industria automovilística estadounidense. En lugar de seguir perdiendo cuota de mercado frente a las compañías de otros países, los fabricantes volverían a ser competitivos si reacondicionasen sus fábricas para producir recargables, de consumo notablemente más sobrio que los híbridos no recargables de las compañías japonesas. También la red eléctrica saldría beneficiada, porque casi todo el mundo recargaría sus vehículos durante la noche, cuando la electricidad es más barata, ayudando así a suavizar los bruscos picos y valles de la demanda eléctrica. En California, por ejemplo, si se reemplazasen 20 millones de automóviles estándar por recargables, el aumento de la demanda eléctrica nocturna se situaría casi al nivel de la diurna; se haría así un uso más racional de la red eléctrica y se mantendrían activas muchas centrales que por las noches permanecen casi paradas. Además, los vehículos eléctricos que no se utilizasen durante el día suministrarían electricidad a las redes de distribución local en momentos de sobrecarga de la red. Los beneficios potenciales para la industria eléctrica son tan importantes, que tal vez ésta incentivase la adquisición de recargables mediante tarifas eléctricas especiales para la recarga de baterías de automóvil.

Lo que reviste mayor interés: los vehículos mixtos recargables no son inventos exóticos para un futuro lejano. DaimlerCrysler ha presentado ya un prototipo de furgoneta con un consumo de gasolina un 40 por ciento menor que el mismo modelo con motor endotérmico. Además, los recargables redoblarían su rendimiento cuando los avances técnicos aumenten la densidad energética de las baterías, lo que permitirá a los vehículos recorrer distancias mayores sólo mediante electricidad.

ciento de su electricidad proceda de fuentes renovables en 2020. Suecia tiene el proyecto de renunciar de plano a los combustibles fósiles.

En su discurso sobre el estado de la nación de enero de 2005, George W. Bush se quejaba de que los EE.UU. eran "adictos al petróleo". Y aunque Bush no lo asociase con el calentamiento global, la mayoría de expertos coinciden en que la adicción de la humanidad a los combustibles fósiles está perturbando el clima del planeta. Ha llegado el momento de actuar. Por fortuna, existen instrumentos para alterar la producción y el consumo de energía en formas que beneficien simultáneamente a la economía y a la biosfera. Sin embargo, en los últimos 25 años, la financiación dedicada a investigación y desarrollo en el sector energético, sea con fondos públicos o de iniciativa privada, se ha desplomado. La fracción del gasto en ese capítulo que se dedica a la energía en los EE.UU. ha caído en el período de 1980 a 2005 desde un 10 por ciento a un 2 por ciento. La financiación pública anual dedicada a investigación y desarrollo en energía se ha desplomado desde 8000 a 3000 millones (de dólares de 2002); la financiación privada de ese mismo apartado se hundió desde los 4000 a los 1000 millones.

Para situar estos declives en su debida perspectiva, considérese que a comienzos de los años ochenta las compañías energéticas invertían en investigación y desarrollo más que las farmacéuticas, mientras que hoy es inferior en un orden de magnitud. La financiación privada total en investigación y desarrollo para todo el sector energético es menor que la de una sola compañía biotecnológica de importancia. (Amgen, por ejemplo, efectuó una inversión en investigación y desarrollo de unos 2000 millones de euros en 2005.) Y si decae la investigación y el desarrollo, decae la innovación.

A modo de botón de muestra, la financiación en investigación y desarrollo para células fotovoltaicas y energía eólica ha ido cuesta abajo durante el último cuarto de siglo y el número de patentes registradas en este campo ha descendido en la misma proporción. La

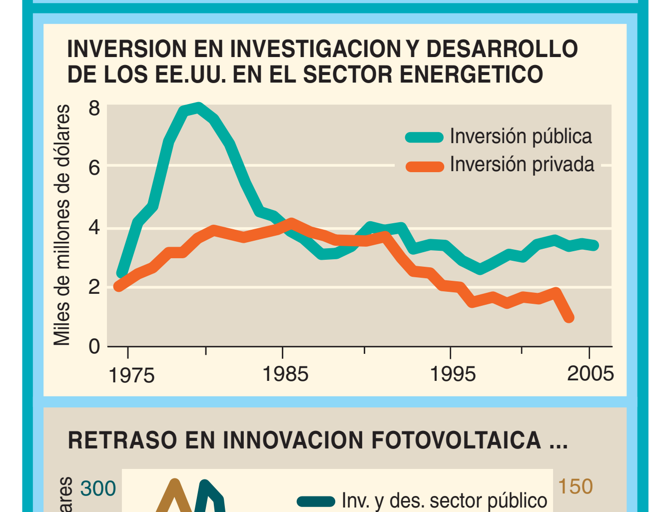
HYMOTION

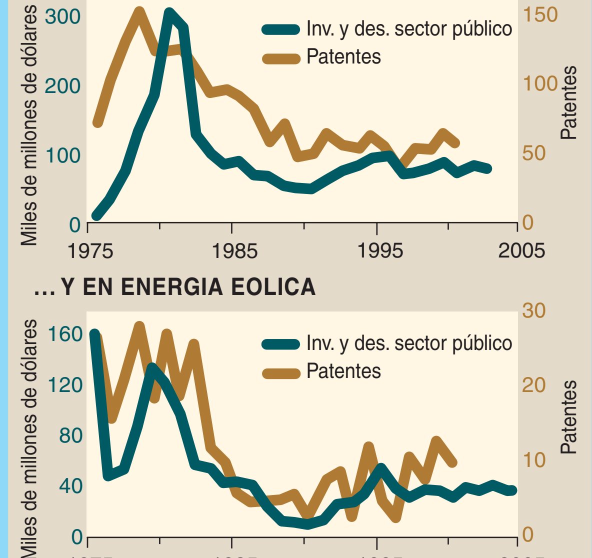
falta de interés por la investigación a largo plazo y la planificación ha debilitado de forma notable la capacidad de los EE.UU. para dar solución a los problemas del cambio climático y a las interrupciones en el aprovisionamiento de energía.

Se han multiplicado los llamamientos en favor de nuevas e importantes iniciativas en investigación y desarrollo en el campo de la energía. Un estudio efectuado en 1997 por la comisión que asesoraba al presidente norteamericano en ciencia y técnica y un informe de la comisión de política energética recomendaban la duplicación del gasto federal en investigación y desarrollo. Pero, ¿bastará con ese incremento? Probablemente no.

INVESTIGACION Y DESARROLLO

El gasto en investigación y desarrollo (en el sector energético de los EE.UU. ha ido cayendo a un ritmo regular desde su valor máximo en 1980. De acuerdo con ciertos trabajos sobre registros de patentes, la falta de financiación ha frenado el desarrollo de técnicas de energías renovables. Así se explica que el número de solicitudes de patente en células fotovoltaicas y en aerogeneración haya caído a plomo al propio tiempo que disminuía la inversión en investigación y desarrollo en estos campos.





Importes en dólares de 2002, para compensar la inflación.

Basándonos en evaluaciones del coste de la estabilización de la cantidad de dióxido de carbono atmosférico y en otros estudios que estiman el éxito de los programas de investigación y desarrollo en energía, así como los ahorros resultantes de nuevas técnicas que pudieran surgir, hemos calculado que sería necesaria una financiación pública de entre 15.000 y 30.000 millones de dólares anuales, es decir, quintuplicar o decuplicar las dotaciones presupuestarias actuales.

El autor y Greg F. Nemet han descubierto que un incremento de esta magnitud sería equiparable a iniciativas federales anteriores en investigación y desarrollo como el Proyecto Manhattan o el Programa Apolo, que, además de alcanzar sus objetivos, generaron beneficios económicos contrastados. Las compañías energéticas estadounidenses podrían también decuplicar su gasto en investigación y desarrollo; aun así, el desembolso sería inferior a la inversión promedio de toda la industria estadounidense. Aunque la financiación gubernamental resulta clave para sostener las primeras fases del desarrollo de técnicas nuevas, la aportación del sector privado en investigación y desarrollo resulta imprescindible para espigar las mejores ideas y rebajar las barreras que dificulten su comercialización.

Pero no todo se reduce a una inversión más generosa. Los centros de enseñanza de todos los niveles —desde el jardín de infancia hasta la universidad— pueden estimular el interés y el compromiso de la población, enseñando de qué modo la producción y el consumo de energía afectan al entorno social y al medio natural. Científicos y empresarios deberían concentrarse también en lograr procedimientos limpios y económicos concebidos para las necesidades energéticas de quienes viven en países en vías de desarrollo. En nuestro grupo de investigación, hemos determinado los beneficios ambientales de la mejora de los hornillos y cocinas africanos.

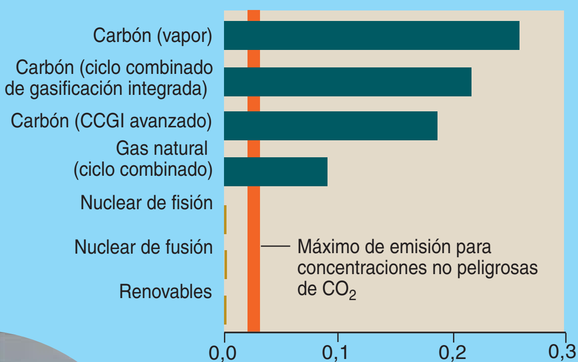
Pero el paso más importante para crear una economía energética viable quizá consista en establecer sistemas de mercado donde el precio de los combustibles carbonados refleje su coste social. El consumo de carbón, petróleo o gas natural impone una carga onerosa: gastos sanitarios derivados de afecciones provocadas por la contaminación atmosférica, gastos militares para asegurar el suministro de petróleo y daños ambientales causados por las explotaciones mineras. Todo ello sin olvidar los efectos económicos potencialmente devastadores del calentamiento global.

Una tasa sobre las emisiones de carbono proporcionaría un método sencillo, lógico y transparente con el que favorecer a las fuentes de energía limpias y renovables, así como penalizar a las que resultan dañinas para la economía y el medio. Los ingresos obtenidos de ese impuesto cubrirían parte de los costes sociales de las emisiones de carbono; una porción quedaría reservada para compensar a las familias de rentas bajas, que gastan en energía una fracción mayor de sus escasos recursos. Además, la tasa sobre el carbono se combinaría con un programa de compraventa de

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: *REVERSING THE INCREDIBLESHRINKING ENERGY R&D BUDGET*; D. M. KAMMEN Y G. NEMET EN *ISSUES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY*, OTOÑO 2005

EL MENOS NOCIVO DE LOS COMBUSTIBLES FOSILES

Aunque las fuentes de energía renovables constituyen el modo óptimo de cercenar de raíz las emisiones de gases de invernadero, la generación de electricidad a partir de gas natural, sustitutivo del carbón, reduce la cantidad de carbono liberado a la atmósfera. Las centrales térmicas de carbón clásicas emiten 0,25 kilogramos de carbono por kilowatt/hora generado (las más avanzadas producen alrededor de un 20 por ciento menos). Pero el gas natural (CH_4) contiene mayor proporción de hidrógeno y menor proporción de carbono que el carbón. Una central de ciclo combinado que queme gas natural emite sólo 0,1 kilogramos de carbono por kilowatt/hora (*diagrama de barras*).



Por desgracia, los impresionantes aumentos en el consumo de gas natural, en los EE.UU. así como en otros países, han hecho que se dispare el precio de este combustible. En el curso de los últimos diez años, el gas natural ha sido, entre las fuentes de combustibles fósiles, la de crecimiento más rápido; en la actualidad genera casi el 20 por ciento de la electricidad estadounidense. Parejamente, el precio del gas natural se ha incrementado desde un promedio de 2,50 a 3 dólares por millón de unidades térmicas británicas en 1997 (entre 8 y 10 euros por millón de kilocalorías) hasta casi tres veces ese precio en la actualidad (de 22 a 27 euros por Mcal).

Las subidas de precio han sido tan alarmantes, que, en 2003, Alan Greenspan, a la sazón presidente de la Reserva Federal, advirtió que los EE.UU. se enfrentaban a una crisis de gas natural. La solución primaria propuesta por la Casa Blanca y por ciertos miembros del Congreso fue aumentar la producción de gas. El Acta de Política Energética de 2005 incluía grandes subsidios para apoyar a los productores de gas, aumentar las prospecciones y las importaciones de gas natural licuado (GNL). Pero puede que estas medidas no garanticen el aprovisionamiento de energía, porque la mayor parte del GNL procedería de los mismos países de la OPEP que suministran petróleo a los EE.UU. Además, la generación de electricidad en las térmicas de gas menos contaminantes seguiría todavía arrojando demasiado carbono en la atmósfera, si se aspira a que el dióxido de carbono se mantenga por debajo de las 450 a 550 partes por millón en volumen (concentraciones superiores acarrearían consecuencias desastrosas para el clima del planeta).

La potenciación del rendimiento energético y el desarrollo de las fuentes renovables pueden resultar más rápidos, económicos y limpios, amén de proporcionar mayor seguridad energética que la promoción de nuevos suministros de gas. La electricidad que produce un parque eólico es menos costosa que la procedente de una central térmica de gas, si en la comparación se cuentan el coste total de construcción de la central y los precios que se prevén para el gas. Además, los parques eólicos o solares se construyen en un tiempo menor que las centrales gasísticas. Y lo que es de importancia crítica, la diversidad de oferta constituye el mayor aliado para mantener un sector energético competitivo e innovador. La promoción de las fuentes renovables tiene pleno sentido en términos económicos, incluso sin tomar en consideración los beneficios ambientales.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: PRESIDENT'S COMMITTEE OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY; STEVEN SENNE *AP Photo (planta de gas natural)*

cuotas, que impondría límites sobre las emisiones de carbono, aunque permitiría que los suministradores de energía menos contaminantes vendieran sus cuotas a competidores no tan limpios.

Lo mejor de todo sería que tales medidas se convirtieran en incentivo económico para que las compañías energéticas llevaran adelante el desarrollo y comercialización de fuentes renovables. Los EE.UU. tienen ante sí la oportunidad de promover una industria *ex novo*. La amenaza del cambio climático viene a ser el toque de asamblea para emprender una revolución de técnicas limpias que reforzaría la base industrial del país, crearía miles de puestos de trabajo y aliviaría el déficit en la balanza de pagos; en vez de importar petróleo del extranjero, se exportarían vehículos de gran eficiencia, electrodomésticos, aerogeneradores y paneles fotovoltaicos. Esta transformación podría lograr que el sector energético estadounidense se convirtiera en lo que parecía imposible: un motor revolucionado para un crecimiento ecológicamente sostenible.

El autor

Daniel M. Kammen es profesor de la Universidad de California en Berkeley, donde dirige su departamento de ingeniería nuclear.

Bibliografía complementaria

REVERSING THE INCREDIBLE SHRINKING ENERGY R&D BUDGET. D. M. Kammen y G. Nemet en *Issues in Science and Technology*, págs. 84-88; otoño, 2005.

SCIENCE AND ENGINEERING RESEARCH THAT VALUES THE PLANET. A. Jacobson y D. H. Kammen en *The Bridge*, vol. 35, n.º 4, págs. 11-17; invierno, 2005.

RENEWABLES 2005: GLOBAL STATUS REPORT. RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Worldwatch Institute, 2005.

ETHANOL CAN CONTRIBUTE TO ENERGY AND ENVIRONMENTAL GOALS. A. E. Farrell, R. J. Plevin, B. T. Turner, A. D. Jones, M. O'Hare y D. M. Kammen en *Science*, vol. 311, págs. 506-508. 27 de enero, 2006.

Buenas expectativas para

El empleo de hidrógeno como combustible para vehículos podría reducir drásticamente, a la larga, el consumo de petróleo y las emisiones de carbono

Joan Ogden

El desarrollo de fuentes de energía más limpias para el transporte constituye quizás el aspecto más peliagudo del rompecabezas energético. La dificultad surge de dos hechos desalentadores. Primero, el parque mundial automovilístico, cifrado ahora en 750 millones, se habrá triplicado en 2050 debido, sobre todo, al creciente poder adquisitivo de los consumidores chinos, indios y de otros países en rápido desarrollo. Segundo: el 97 por ciento del combustible que consumen hoy los medios de transporte procede de crudos de petróleo.

A corto plazo, gastar menos combustible constituye el mejor modo de frenar el aumento del consumo de petróleo y, con ello, de las emisiones de gases de invernadero de los motores de explosión. Pero, aunque los fabricantes de automoción triplicasen el rendimiento de sus modelos y los gobiernos apostaran por el transporte público y el crecimiento moderado, el aumento explosivo del número de vehículos a escala mundial limitaría las reducciones en el consumo de petróleo y en las emisiones de dióxido de carbono.

Para lograr mayores recortes, el sector de transportes debe cambiar a combustibles no petrolíferos y de bajo contenido en carbono. Los combustibles líquidos obtenidos de plantas leñosas o sintetizados a partir de arenas bituminosas o hullas pueden desempeñar aquí una función importante. A largo plazo, sin embargo, los sistemas que ofrecen mayor viabilidad en la propulsión de vehículos con rendimiento elevado y emisiones cero pasan por conexiones a la red eléctrica o por el empleo de combustible de hidrógeno.

Por desgracia, la comercialización de vehículos eléctricos se ha visto frustrada por un obstáculo abrumador. Ni siquiera las mayores baterías acumulan energía suficiente para dotar a los vehículos de una autonomía equiparable a la de los motores de gasolina. Por ello, la mayoría de las empresas de automoción han abandonado esa técnica.

Los vehículos de pila de combustible combinan hidrógeno (el combustible) con el oxígeno del aire para generar la energía que alimenta un motor eléctrico. Entrañan un número menor de obstáculos técnicos; cuentan, además, con el apoyo de los fabricantes de autos, las empresas del sector energético y los políticos. Los vehículos de pila de combustible ofrecen una eficiencia varias veces mayor que la de

1. ¿LLEGARA UN DIA EN QUE LOS AUTOMOVILISTAS llenen sus depósitos con hidrógeno? Antes de que se convierta en realidad un futuro propulsado con hidrógeno, deberán vencerse numerosas dificultades, muy complejas.

MATT VINCENT; JOE RAEDLE *Getty Images (fotografía)*

RESUMEN

- Los coches con motor de hidrógeno podrían cuajar comercialmente si los fabricantes lograran unos modelos seguros, económicos y duraderos, capaces de recorrer largas distancias sin repostar.
- Las compañías energéticas podrían producir grandes cantidades de hidrógeno a precios competitivos con la gasolina, pero la construcción de la infraestructura de distribución requerirá inversiones multimillonarias.

el HIDROGENO

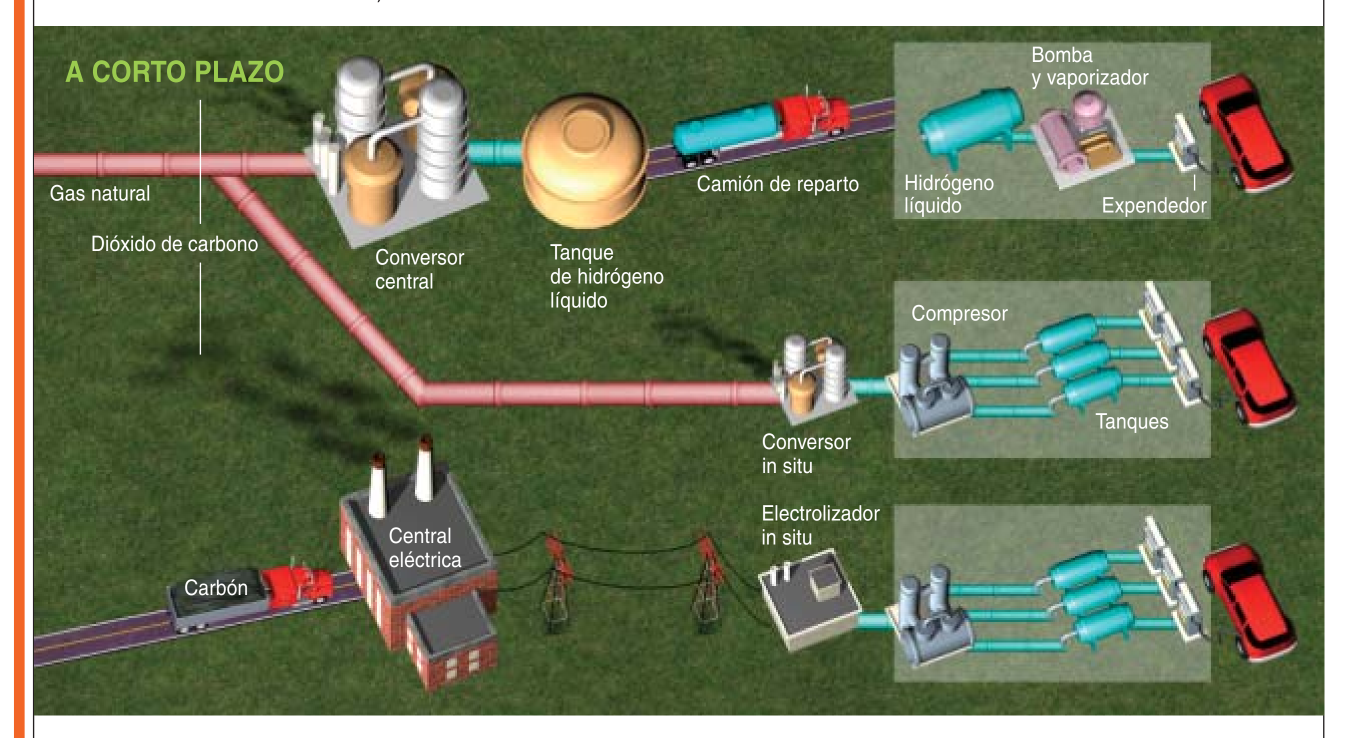


los autos de gasolina actuales; por el tubo de escape emiten sólo vapor de agua.

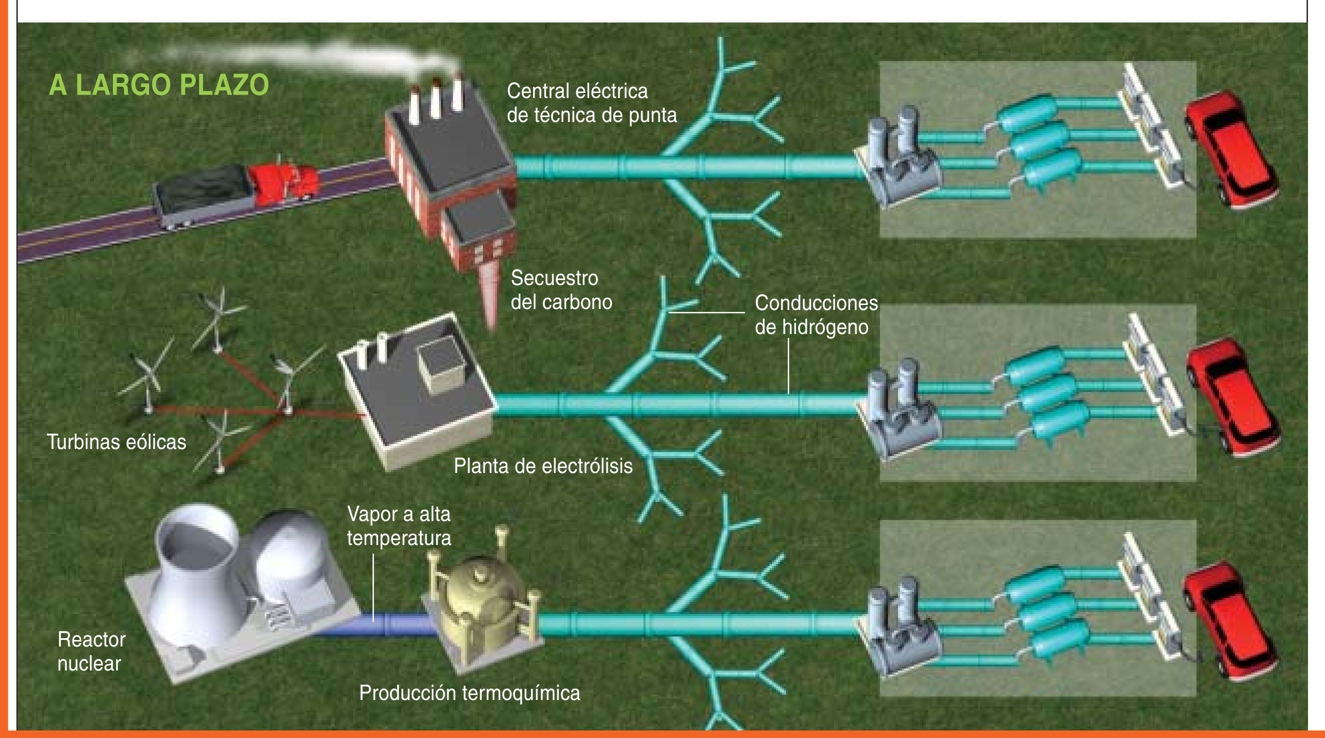
Más aún, la obtención del hidrógeno combustible no libera gases de invernadero a la atmósfera. Por ejemplo, la energía necesaria para obtener hidrógeno por electrólisis —descomposición del agua, mediante electricidad, en hidrógeno y oxígeno— procede de células solares, turbinas eólicas, plantas hidroeléctricas y centrales geotérmicas; todas ellas, fuentes renovables. Otra posibilidad consiste en extraer el hidrógeno de combustibles fósiles (gas natural y hullas), con el posterior secuestro bajo tierra de los subproductos carbónicos.

OPCIONES PARA UNA INFRAESTRUCTURA DEL HIDROGENO

Para la obtención y distribución del hidrógeno se recurriría a varias técnicas. A corto plazo, se recomienda la extracción del hidrógeno del gas natural; conversores centrales abastecerían a las estaciones de repostaje a través de camiones de reparto, o bien mediante conversores de tamaño inferior instalados en las mismas estaciones de suministro. El hidrógeno podría obtenerse también en las propias estaciones: por electrólisis del agua, mediante la electricidad de la red eléctrica general. Todas estas opciones, sin embargo, producirían emisiones de gases de invernadero (se da por sentado que la electricidad se extraería de combustibles fósiles).



A largo plazo, los responsables políticos deben fomentar métodos de obtención más limpios. Plantas eléctricas de técnica de punta extraerían el hidrógeno de la hulla y enterrarían el dióxido de carbono a gran profundidad. Turbinas eólicas y otras fuentes renovables suministrarían la energía para la electrólisis. El vapor de agua a altas temperaturas procedente de reactores nucleares generaría hidrógeno mediante la descomposición termoquímica del agua.



DON FOLEY

Para que un futuro tan hidrogenado se haga realidad, deberán vencerse numerosas y complejas dificultades. Los fabricantes de autos deben aprender a manufacturar nuevos tipos de vehículos, que resulten atractivos para los consumidores. Las compañías energéticas deben adoptar nuevas técnicas de producción de hidrógeno y construir las nuevas infraestructuras de distribución de combustible que sustituirían a los actuales sistemas de refino y distribución de gasolina. El hidrógeno no solventará todos nuestros problemas en un día; de hecho, podrían pasar decenios antes de que empezara a reducir las emisiones de gases de invernadero y el consumo de petróleo a escala global. La transición al hidrógeno guarda mayor semejanza con un maratón que con un esprint.

El futuro de la pila de combustible

Durante el último decenio, diecisiete países han anunciado programas nacionales para el desarrollo de la energía hidrogénica, con su correspondiente asignación de miles de millones de dólares del erario público. Más de 30 estados de los EE.UU. y varias provincias canadienses están desarrollando planes similares. La mayoría de los principales fabricantes de automóviles están exhibiendo prototipos de vehículos de hidrógeno e invirtiendo centenares de millones de dólares en investigación y desarrollo. Honda, Toyota y General Motors (GM) han anunciado planes para comercializar vehículos de pila de combustible entre 2010 y 2020. Firmas de automoción y las compañías energéticas Shell, Chevron y BP están trabajando con los gobiernos para introducir las primeras flotas de vehículos de hidrógeno, además de pequeñas redes de repostaje en California, el noreste de EE.UU., Europa y China.

Esa oleada de interés por el hidrógeno surge no sólo de sus beneficios ecológicos a largo plazo, sino también de su potencial para estimular la innovación. Los fabricantes de automóviles se han adherido a los coches de pila de combustible porque auguran convertirse en unos magníficos productos de consumo. Esta técnica promete un funcionamiento silencioso, aceleraciones rápidas y mantenimiento barato. La sustitución de los motores de combustión interna por motores eléctricos y de pila de combustible torna innecesarios a numerosos subsistemas mecánicos e hidráulicos; este cambio proporciona, a las empresas de automoción, mayor flexibilidad en el diseño de sus vehículos y la capacidad para mejorar la eficiencia del proceso de fabricación.

Más aún, los vehículos de pila de combustible dotarían a sus propietarios de una fuente móvil de electricidad, que podrían emplear con otros propósitos. En los períodos de picos de consumo, cuando la tarifa eléctrica es más cara, los coches de hidrógeno harían también de grupos electrógenos, con lo que proporcionarían a hogares y oficinas un suplemento de energía barata, mientras permanecen estacionados en las cercanías.

Los fabricantes de coches deberán ocuparse también de hacer que los vehículos de hidrógeno resulten más atractivos para los consumidores. Un componente clave de la pila de combustible para automóviles es la membrana de intercambio protónico (PEM, de "Protonic Exchange Membrane"): separa el combustible, el hidrógeno, del oxígeno. A un lado de la membrana, un catalizador escinde los átomos de hidrógeno en protones y electrones; luego, los protones cruzan la membrana y se combinan con los átomos de oxígeno que hay al otro lado. Los fabricantes han reducido el peso y el volumen de las pilas de combustible con PEM para que encajen en el interior de un coche compacto. Pero las membranas se degradan con el uso; las actuales pilas con PEM duran sólo unas 2000 horas, menos de la mitad de las 5000 horas de vida necesarias para que un vehículo se considere comercial. Se están desarrollando membranas más duraderas. A finales de 2005, investigadores de 3M informaron de nuevos diseños que podrían situar las pilas de combustible en las 4000 horas, y más, dentro de los próximos cinco años.

El abaratamiento de las pilas constituye otro de los retos principales. Los autos de pila de combustible actuales son piezas de artesanía: cuestan un millón de dólares la unidad. Tan elevado precio se debe, en parte, al número exiguo de flotillas experimentales; si esos vehículos se produjeran en masa, el costo de los sistemas de propulsión bajaría a una cifra más razonable de entre 6000 y 10.000 dólares. Ese precio equivale a 125 dólares por kilowatt de potencia en el motor, unas cuatro veces los 30 dólares por kilowatt de un motor equiparable de combustión interna.

Las pilas de combustible podrían requerir materiales y métodos de fabricación de nuevo cuño para ponerse a la par con los motores de gasolina. Acaso también los fabricantes de autos pudieran disminuir los costos mediante diseños que se adaptaran a la singularidad de la pila de combustible. Según General Motors, los coches de hidrógeno podrían acabar resultando más baratos que los de gasolina, pues contarían con menos piezas móviles y una arquitectura más flexible.

Los ingenieros de automoción deben desarrollar un sistema de almacenamiento de hidrógeno que asegure una autonomía razonable, de unos 500 kilómetros. El almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso requiere cilindros de presión elevada y gran tamaño. Aunque el hidrógeno líquido ocupa menos espacio, exige un sobreenfriamiento a temperaturas por debajo de –253 grados Celsius. Los fabricantes de automóviles están estudiando el uso de sistemas de hidruros metálicos que absorben el hidrógeno bajo presión, pero esos dispositivos tienden a pesar demasiado (unos 300 kilogramos).

El desarrollo de un método de almacenamiento constituye una de las principales cuestiones pendientes de la investigación sobre el combustible de hidrógeno. A falta de una técnica avanzada, la mayoría de los vehículos de pila de combustible optan hoy por el almacenamiento del hidrógeno en forma de gas comprimido. Con un envasado ingenioso a mayor presión, esos coches se acercan a una autonomía viable, sin comprometer el volumen del maletero ni el peso del vehículo.

En 2005, General Motors, Honda y Toyota presentaron coches compactos de célula de combustible con unos 500 kilómetros de autonomía; empleaban gas hidrógeno a 70 megapascal. (La presión atmosférica al nivel del mar es de alrededor de 0,1 megapascal.)

Con anterioridad a la introducción de un combustible nuevo, debe considerarse la seguridad del mismo. Aunque

el hidrógeno es inflamable, su temperatura de ignición se encuentra por encima de ese parámetro en el caso de la gasolina; además, se dispersa en el aire mucho más rápido que ésta, lo que reduce el riesgo de incendio. Presenta, sin embargo, algunos inconvenientes: la gama de concentraciones inflamables es más amplia y las llamas son poco visibles. Las refinerías de petróleo, las plantas químicas y otras instalaciones industriales manipulan, de forma segura, cantidades inmensas de hidrógeno; con la ingeniería adecuada puede hacerse que este combustible no resulte peligroso para las aplicaciones de consumo. El Departamento de Energía estadounidense y otras organizaciones preparan códigos y normas de seguridad para el combustible de hidrógeno.

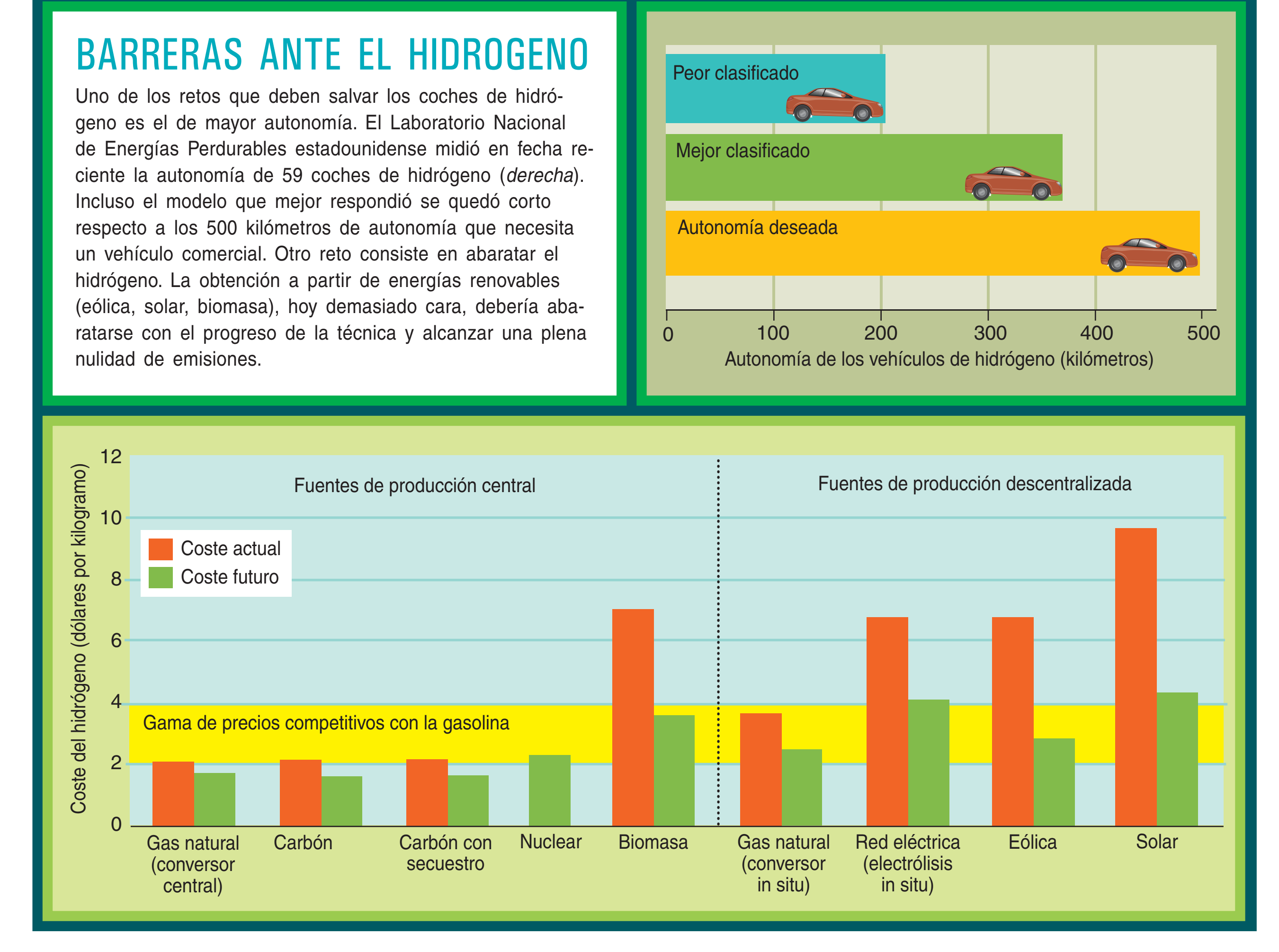
Una vez listos, ¿cuánto tardarían los coches de hidrógeno en hacerse con una buena cuota del mercado y en comenzar a reducir las emisiones de carbono y el consumo de petróleo? Puesto que un coche dura unos 15 años, se tardaría al menos eso en cambiar todo el parque al nuevo sistema. En general, tras pasar por las investigaciones precomerciales, el desarrollo y las demostraciones prácticas, una nueva técnica de automoción se introduce en el mercado en un modelo de coche; sólo al cabo de un tiempo aparece en varios vehículos. (Por ejemplo, los motores híbridos gas-eléctricos se desarrollaron primero para sedanes compactos y se incorporaron luego a los utilitarios deportivos.) Los costos suelen reducirse conforme aumentan los volúmenes de producción; ello estimula la innovación.

Una técnica nueva puede tardar de 25 a 50 años en infiltrarse en una fracción considerable del parque automovilístico. Aunque la investigación básica sobre vehículos híbridos comenzó en la década de los setenta, hasta 1993 Toyota no inició el desarrollo del Prius. Las primeras ventas llegaron a fines de 1997; ocho años después, los modelos de híbridos de varios fabricantes cubren sólo el 1,2 por ciento de las ventas de coches nuevos en EE.UU.

Obtención del hidrógeno

Lo mismo que la electricidad, el hidrógeno hay que extraerlo de alguna fuente de energía. En su mayor parte se obtiene ahora mediante el tratamiento, a alta temperatura, de gas natural y petróleo. Las refinerías emplean hidrógeno en la purificación de combustibles derivados del petróleo; las plantas químicas en la obtención de amoníaco y otros compuestos.

La producción de hidrógeno consume hoy el dos por ciento de la energía global; un porcentaje que crece sin cesar. Si todo ese hidrógeno se consumiera en automóviles, propulsaría en torno a 150 millones de vehículos, del orden del 20 por ciento del parque mundial. Aunque la mayor parte del hidrógeno se produce y consume en las refinerías y las plantas químicas, del 5 al 10 por



BARRERAS ANTE EL HIDROGENO

Uno de los retos que deben salvar los coches de hidrógeno es el de mayor autonomía. El Laboratorio Nacional de Energías Perdurables estadounidense midió en fecha reciente la autonomía de 59 coches de hidrógeno (*derecha*). Incluso el modelo que mejor respondió se quedó corto respecto a los 500 kilómetros de autonomía que necesita un vehículo comercial. Otro reto consiste en abaratar el hidrógeno. La obtención a partir de energías renovables (eólica, solar, biomasa), hoy demasiado cara, debería abaratarse con el progreso de la técnica y alcanzar una plena nulidad de emisiones.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: LABORATORIO NACIONAL DE ENERGIAS RENOVABLES (*autonomía de los vehículos*); CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACION Y ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERIA (*coste del hidrógeno*); JANET CHAO (*coches*)

ciento se remite, mediante camión o gasoductos, a sitios alejados. En EE.UU., este sistema de distribución transporta energía suficiente para abastecer varios millones de vehículos; la infraestructura serviría de trampolín a la economía del hidrógeno.

Pero la obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles genera dióxido de carbono. Si el hidrógeno se obtuviera del gas natural, el método más corriente en la actualidad, y se utilizara en un vehículo eficiente de pilas de combustible, las emisiones totales de gases de invernadero resultarían del orden de 110 gramos por kilómetro recorrido. Esta cantidad es algo inferior al total de las emisiones de un híbrido de gasolina (150 gramos por kilómetro) y significativamente menor que las de los coches actuales de gasolina (195 gramos por kilómetro).

La meta última consiste en la producción de hidrógeno sin emisiones de gases de invernadero en lo posible. Una opción estriba en capturar el dióxido de carbono que se genera en la extracción del hidrógeno de combustibles fósiles e inyectarlo bajo tierra o en las profundidades oceánicas. Este proceso permitiría una producción de hidrógeno limpia, a gran escala y a bajo coste, pero exigiría fundamentar la viabilidad técnica y la seguridad ecológica del secuestro del carbono.

Otra técnica recurre a la gasificación de biomasa: calentamiento de materiales orgánicos (residuos leñosos y de cosechas) para provocar la liberación de hidrógeno y monóxido de carbono. (Este proceso no vierte gases de invernadero a la atmósfera, porque las emisiones de carbono están compensadas por el dióxido de carbono que absorbieron las plantas durante su crecimiento.)

De acuerdo con una tercera posibilidad se recurriría a la electrólisis del agua mediante energía eólica, solar y otras renovables.

Aunque la electrólisis y la gasificación de biomasa no entrañan dificultades técnicas de importancia, los costos actuales de producción de hidrógeno por esos métodos son elevados: de 6 a 10 dólares por kilogramo. (Un kilogramo de hidrógeno tiene el mismo contenido energético que un poco menos de cuatro litros de gasolina, pero mueve un coche hasta una distancia varias veces mayor que la lograda por los motores al uso de gasolina, porque el rendimiento de las pilas de combustible es mayor.)

Según estimaciones recientes del Consejo Nacional de Investigación y de la Academia Nacional de Ingeniería estadounidenses, las técnicas futuras y la producción masiva rebajarían el precio del hidrógeno en el surtidor a entre 2 y 4 dólares por kilogramo. En tal situación, el hidrógeno para un coche de pila de combustible costaría menos por kilómetro que la gasolina para un coche actual.

La energía para la electrólisis podría ser también de origen nuclear, aunque el procedimiento no resultaría más barato que otro basado en fuentes renovables. Además, las centrales nucleares generarían hidrógeno sin electrólisis: el intenso calor de los reactores descompone el agua mediante un proceso termoquímico. Se obtendría así un hidrógeno más barato, aunque de viabilidad todavía no contrastada. Por otra parte, cualquier opción relacionada con la energía nuclear presenta los mismos inconvenientes que han acosado durante decenios a la industria nucleoeléctrica: problemas con los residuos radiactivos, de proliferación y de aceptación popular.



2. UN CHASIS MONOPATIN, que incluye todos los sistemas de propulsión y control, maximiza el espacio interior del Hy-wire, prototipo de coche de hidrógeno de General Motors.

GENERAL MOTORS

Una nueva infraestructura energética

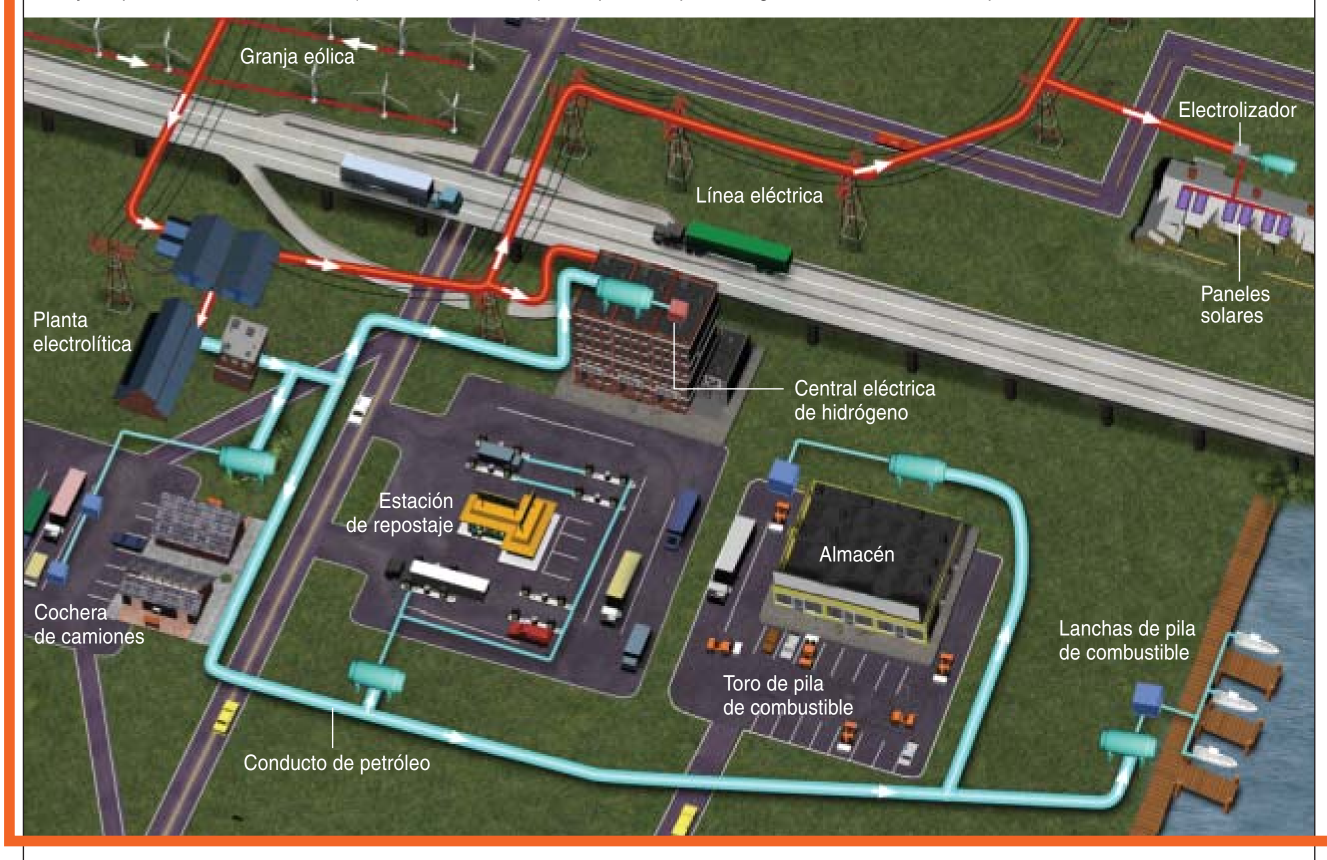
Dado que EE.UU. dispone de espléndidos recursos eólicos, solares y de biomasa, la fabricación de grandes cantidades de hidrógeno limpio y barato no resultará difícil. El mayor problema es logístico: ¿cómo distribuir el hidrógeno a buen precio entre múltiples puntos dispersos? En la actualidad, en EE.UU. hay sólo unas 100 estaciones de repostaje de hidrógeno, instaladas con fines demostrativos; el número de estaciones de gasolina, en cambio, asciende a 170.000. La conversión de las gasolineras al suministro de hidrógeno no es directa: el gas debe manejarse y almacenarse de modo distinto del seguido con los combustibles líquidos como la gasolina; el surtidor requiere, pues, otras técnicas.

Para la incipiente economía del hidrógeno, la necesidad de una nueva infraestructura se traduce en un problema del tipo del “huevo o la gallina”. El público no comprará vehículos de hidrógeno a menos que se disponga de una extensa red de venta del combustible a precios razonables, pero los proveedores de combustible no plantarán estaciones de hidrógeno mientras no haya clientes suficientes. Y aunque el estudio del Consejo Nacional de Investigación prevé que el hidrógeno será competitivo con la gasolina una vez que haya disponible una extensa red de distribución, el hidrógeno podría resultar más caro durante los primeros años de esta transición.

Para el arranque de esta conversión energética conviene concentrarse primero en las flotas de vehículos que no precisan de una red amplia de repostaje (furgonetas de reparto, autobuses o camiones). También los motores de embarcaciones y las locomotoras funcionarían con hidrógeno, lo que eliminaría no pocas emisiones con-

MULTIPLES USOS DEL HIDROGENO

Dado que el transporte de hidrógeno a largas distancias resultaría caro, cada planta generadora debería limitarse al abastecimiento de su zona. Los primeros usuarios serían vehículos de flota (camiones, autobuses, etcétera) y pequeños vehículos que hoy emplean baterías eléctricas (toros de almacenes). Las pilas de hidrógeno se emplearían también en motores de embarcaciones y ofrecerían electricidad suplementaria a los edificios de oficinas. Los propietarios de coches de hidrógeno cargarían combustible en las estaciones de servicio o generarían su propio hidrógeno en casa, mediante paneles solares.



DON FOLEY

taminantes. Con pilas de combustible podrían equiparse carretillas elevadoras, motociclos, bicicletas eléctricas y otros vehículos pequeños que hoy emplean baterías eléctricas. Se incorporarían también en grupos electrógenos estáticos: en comisarías de policía, bases militares y otros usuarios que no desearan depender exclusivamente de la red eléctrica general. Estos mercados especializados ayudarían a rebajar el precio de las pilas de combustibles y animarían a las compañías energéticas a instalar las primeras estaciones de hidrógeno.

Para incidir a escala mundial en el consumo de petróleo y en las emisiones de gases de invernadero, el combustible hidrógeno deberá abrirse paso en el comercio de los coches de turismo. De acuerdo con las investigaciones acometidas en la Universidad de California en Davis, para que los propietarios de coches de pila de combustible disfruten de la misma comodidad que los consumidores de gasolina, deberían suministrar hidrógeno entre el 5 y el 10 por ciento de las estaciones de servicio urbanas (más unas pocas entre ciudades).

Según las estimaciones de General Motors, dar servicio a escala nacional de EE.UU. al primer millón de vehículos de hidrógeno requeriría unas 12.000 estaciones en ciudades y carreteras interestatales, al costo de un millón de dólares cada una. La construcción de un sistema de aprovisionamiento de hidrógeno a gran escala para atender a los cien millones de vehículos que circulan en EE.UU. podría costar varios centenares de miles de millones de dólares, que se invertirían a lo largo de decenios. Esta estimación incluye no sólo los costes de la construcción de las estaciones de repostaje, sino también de los nuevos sistemas de producción y distribución que se requerirán si se generaliza el uso combustible del hidrógeno.

Tales cifras pueden parecer abrumadoras. Sin embargo, según las previsiones del Consejo Mundial de la Energía, los costes de infraestructura para el mantenimiento y ampliación de la economía estadounidense de la gasolina durante los próximos 30 años ascenderán a 1,3 billones de dólares, más de la mitad de los cuales se gastarán en los países en vías de desarrollo productores de petróleo. De esa cantidad, la mayor parte se destinará a la prospección y producción de petróleo. Unos 300.000 millones de dólares serán para refinerías, oleoductos y cisternas: equipamientos que podrían remplazarse por un sistema de producción y distribución de hidrógeno. La construcción de una economía del hidrógeno es cara, pero así son los negocios.

Existen varios procedimientos para abastecer de hidrógeno a los vehículos. El hidrógeno puede producirse en

plantas de alcance regional, almacenarse en forma líquida o gaseosa comprimida, y distribuirse a las estaciones de servicio por cubas o gasoductos. Puede también obtenerse in situ, en las propias estaciones o en los domicilios particulares, a partir de gas natural o electricidad. En las primeras etapas de una economía del hidrógeno, cuando el número de vehículos de pila de combustible sea reducido, la distribución en camión o la producción in situ constituirán, quizá, las opciones más económicas. Pero cuando la demanda sea elevada —para un 25 por ciento de los vehículos de una ciudad, por ejemplo— la opción más barata corresponde a una planta regional con distribución por gasoducto. Este sistema de producción central allana el camino al secuestro del carbono, que tiene sentido sólo a gran escala.

En numerosos aspectos, el hidrógeno guarda mayor semejanza con la electricidad que con la gasolina. Dado que su transporte y almacenamiento resultan más caros que los de la gasolina, lo más probable es que la producción se reparta por todo el país; cada planta productora atendería al mercado regional. Es más, las rutas de abastecimiento dependerán de la ubicación. La infraestructura no sería la misma en Ohio —donde abundan la hulla y los enclaves adecuados para el secuestro del dióxido de carbono— que en el Noroeste (donde la energía hidráulica es barata) o en el Medio Oeste (que aprovecha la energía eólica y los biocombustibles). Para la distribución del hidrógeno, una ciudad pequeña o una zona rural podrían recurrir al abastecimiento por camión o a la producción in situ, mientras que una ciudad de mayor tamaño y con alta densidad de población podría servirse de una red de gasoductos.

El desarrollo de una economía del hidrógeno entraña ciertos riesgos financieros. Si una compañía energética construyese instalaciones gigantes de producción o distribución, y el mercado de pilas de combustible creciese más lento que lo esperado, la empresa podría exponerse a perder parte de la inversión. Nos referimos al problema de los "activos varados". Para minimizar el riesgo, el sector energético debería aumentar el suministro de hidrógeno de forma gradual, acompasado a la demanda. Por ejemplo, las compañías construirían centrales eléctricas que generaran a la vez electricidad y un pequeño flujo de hidrógeno para los primeros vehículos de pilas de combustible. En cuanto a la distribución, las compañías empezarían con un reparto mediante camiones; los gasoductos y otras inversiones sustanciosas se demorarían hasta el momento en que se hubiera creado una demanda importante y estable.

Primeros pasos

El camino hacia un sistema de transportes basado en el hidrógeno se compone de varias sendas paralelas. Potenciar el ahorro de combustible constituye el primer paso esencial. El desarrollo de coches ligeros, motores de mayor eficiencia y trenes de propulsión híbridos eléctricos reduciría las emisiones de carbono y el consumo de petróleo durante los dos o tres próximos decenios. El hidrógeno y las pilas de combustibles se cimentarían sobre esa evolución técnica; aprovecharían las mejoras en el rendimiento y la creciente electrificación de los vehículos.

El desarrollo de la infraestructura del combustible hidrógeno durará decenios; avanzará al compás del crecimiento en la demanda de vehículos de hidrógeno. Mediante proyectos como la Red de Autopistas de Hidrógeno de California ("California Hydrogen Highways Network") y el HyWays en Europa, las compañías energéticas están ya suministrando hidrógeno a flotas experimentales y comprobando el funcionamiento de las técnicas de repostaje. Para que los vehículos de hidrógeno penetren en los mercados de masas en 10 o 15 años, debería haber para entonces combustible disponible a un precio competitivo. La concentración de proyectos hidrogénicos en regiones clave como el sur de California o el corredor del Noreste podrían acelerar el crecimiento del mercado de pilas de combustible y reducir el volumen de las inversiones en infraestructura.

A corto plazo, el grueso del hidrógeno se extraerá del gas natural. Este sistema recortará sólo moderadamente las emisiones de gases de invernadero, en comparación con los vehículos híbridos; para que los beneficios del hidrógeno sean máximos, las compañías deben obtenerlo de fuentes energéticas, sin contenido en carbono o bien con el secuestro de los subproductos carbónicos. Cuando el hidrógeno se haya convertido en un combustible de primera fila —a partir de 2025— los gobiernos deberán aplicar de forma escalonada normativas que anulen las emisiones derivadas de su obtención.

En el ínterin, las políticas tendrían que primar los esfuerzos en curso para el desarrollo de técnicas energéticas limpias, como la eólica, la solar y la gasificación de la biomasa, así como el secuestro del carbono. El cambio a una economía del hidrógeno puede considerarse parte de un movimiento más amplio hacia una economía menos "carbónica".

Pese a que la transición podría durar decenios, los vehículos de hidrógeno ayudarían a proteger el clima del planeta y a reducir la dependencia del petróleo. El enorme potencial de esta nueva industria subraya la importancia de la investigación, el desarrollo y la comprobación de las técnicas del hidrógeno, para que estén listas cuando las necesitemos.

La autora

Joan Ogden es profesora de ciencias y política ambientales en la Universidad de California en Davis. Codirige el Programa Hydrogen Pathways en el Instituto de Estudios sobre Transportes del mismo centro. Investiga sobre combustibles alternativos, pilas de combustible, energías renovables y conservación de la energía.

Bibliografía complementaria

THE HYDROGEN ECONOMY: OPPORTUNITIES, COSTS, BARRIERS, AND R&D NEEDS. National Research Council y la National Academy of Engineering. National Academies Press, 2004.

THE HYDROGEN ENERGY TRANSITION: CUTTING CARBON FROM TRANSPORTATION. Dirigido por Daniel Sperling y James S. Cannon. Elsevier, 2004.

THE HYPE ABOUT HYDROGEN: FACT AND FICTION IN THE RACE TO SAVE THE CLIMATE. Joseph J. Romm. Island Press, 2005.



Un plan *B* para la energía

Si el progreso de las técnicas actuales no logra detener el calentamiento de la Tierra, ¿será posible que fuentes energéticas nuevas y revolucionarias, libres de carbono, salven la situación? No hay que darlo por hecho, pero tampoco debe descartarse

W. Wayt Gibbs

RESUMEN

- Técnicas nuevas y ambiciosas podrían contribuir a saciar la sed de energía del mundo sin agravar el cambio climático.
- Con el tiempo, acabarán siendo necesarias para cercenar la emisión de dióxido de carbono. Pero si los métodos tradicionales no logran limitarlas como se desea, tal vez sea necesario recurrir a ellas antes de lo previsto.

1. ENTRE LAS FUENTES DE ENERGIA de finales del siglo XXI podrían contarse reactores nucleares de fusión, hidrógeno emitido por lagunas de microorganismos obtenidos por ingeniería genética, parques eólicos a gran altitud sobre la superficie de la Tierra, sistemas de energía solar en órbita y generadores basados en las fuerzas de las olas y de las mareas, conectados a una red eléctrica superconductora mundial.



Para que nuestro mundo siga acogiendo la vida en las condiciones en que deseamos que lo haga, la humanidad ha de recorrer un largo derrotero, jalonado por cambios técnicos, cuya meta se encuentra mucho más allá del horizonte. Robert H. Socolow y Stephen W. Pacala, de la Universidad de Princeton, comparan en este mismo número la tarea a una carrera de relevos entre varias generaciones. Esbozan una estrategia para ganar la primera manga: medio siglo para frenar las emisiones de dióxido de carbono tras un siglo de aceleración desenfrenada. Las técnicas ya existentes, aplicadas con sabiduría y prontitud, deberían permitir llegar a esta primera referencia sin descabalar la economía mundial. Un plan A bien concebido.

Pero no es infalible. Depende de que las sociedades impriman velocidad a una serie de medidas de reducción del uso del carbono para formar siete "cuñas", cada una de las cuales evitaría que lleguen a la atmósfera 25.000 millones de toneladas de carbono. Salir demasiado tarde, una pausa demasiado pronto, nos harían perder la carrera. No faltan científicos que opinen que la estabilización de los gases de invernadero podría exigir hasta 18 cuñas allá por 2056, en vez de las siete previstas por Socolow y Pacala.

Sería un error suponer que las emisiones de carbono van a ir aumentando más lentamente que el producto económico y el consumo de energía, señala Martin I. Hoffert, de la Universidad de Nueva York: por la elevación de los precios del petróleo y del gas, la industria vuelve al carbón. Está prevista, añade, la construcción de 850 nuevas centrales de carbón en los EE.UU., China e India, naciones que no han suscrito el protocolo de Kioto. En 2012, las emisiones de esas plantas quintu-

plicarán las reducciones acordadas en Kioto.

Aun cuando el plan A llegase a funcionar y los adolescentes de hoy lograran cubrir la primera etapa para el día de su jubilación, la carrera estaría ganada sólo a medias. Habría de tomar el testigo una nueva generación. Y tendría que conseguir en la siguiente etapa —la más difícil, tal vez— que en el año 2106 la emisión anual de CO_2 se haya reducido a la mitad.

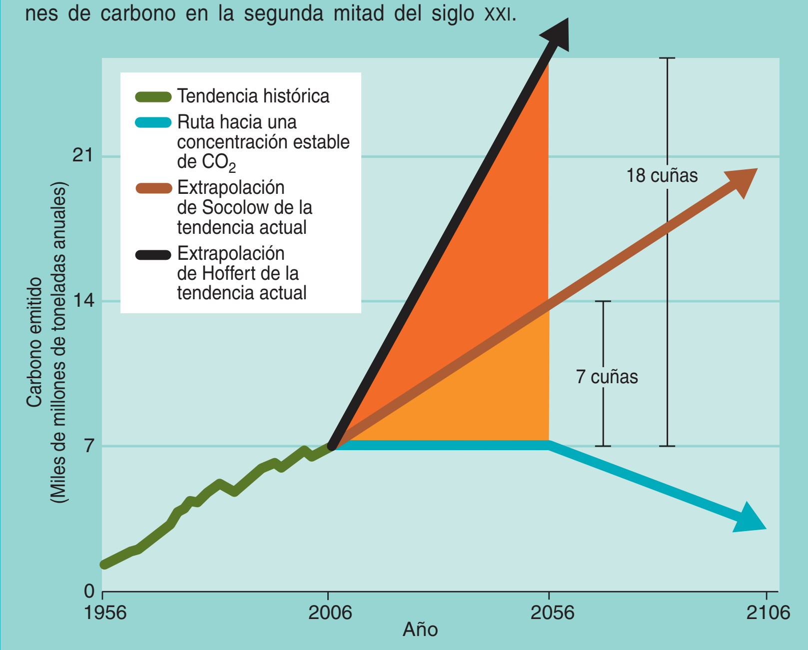
Antes o después, el mundo va a necesitar un plan B: una o varias técnicas de naturaleza esencialmente nueva, capaces de generar en conjunto entre 10 y 30 terawatt sin emitir una sola tonelada de dióxido de carbono. Desde los años sesenta se lleva dando vueltas a un sinfín de osadas ideas a las que nadie presta oídos. Ya es hora de tomarlas en consideración. La infraestructura de un cambio revolucionario en los sistemas de producción de energía ha de empezar a construirse ahora, porque si no, advierte Hoffert, no llegará a tiempo.

Pero, ¿qué se ha de construir? Vamos a examinar algunas de las opciones más prometedoras con otras dos, aunque populares, inverosímiles. Ninguna de ellas ofrece plenas garantías. Sin embargo, alguna podría en el futuro alimentar de energía a la civilización.

PLAN B: ¿MAS TARDE O MAS TEMPRANO?

Para evitar un calentamiento planetario catastrófico hay que colmar la distancia entre la cantidad de carbono que se emitirá de seguir las cosas el rumbo actual y el mantenimiento de las emisiones en su nivel actual como parte de una trayectoria hacia una concentración estable de dióxido de carbono. Esa distancia puede abrirse mucho más rápidamente de lo que Robert H. Socolow, de la Universidad de Princeton, y muchos economistas suelen estimar, advierte Martin I. Hoffert, de la Universidad de Nueva York. El modelo de las “siete cuñas” supone que tanto la energía consumida por unidad monetaria de producto mundial bruto como el carbono emitido por kilowatt-hora de energía seguirán disminuyendo. Hoffert señala, sin embargo, que China e India han empezado a “recarbonarse” y a emitir más CO_2 por kilowatt cada año, debido a que están construyendo centrales térmicas de carbón. La razón entre el carbono y la energía también ha dejado de descender en los EE.UU. Socolow reconoce que las previsiones correspondientes a las siete cuñas dan por conseguidos importantes avances en la eficiencia de los sistemas y en la producción de energía renovable dentro la actividad económica normal.

Pero aunque resultasen correctas las hipótesis menos pesimistas, seguirían siendo necesarias técnicas revolucionarias para reducir a la mitad las emisiones de carbono en la segunda mitad del siglo XXI.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: ROBERT H. SOCOLOW Y MARTIN I. HOFFERT

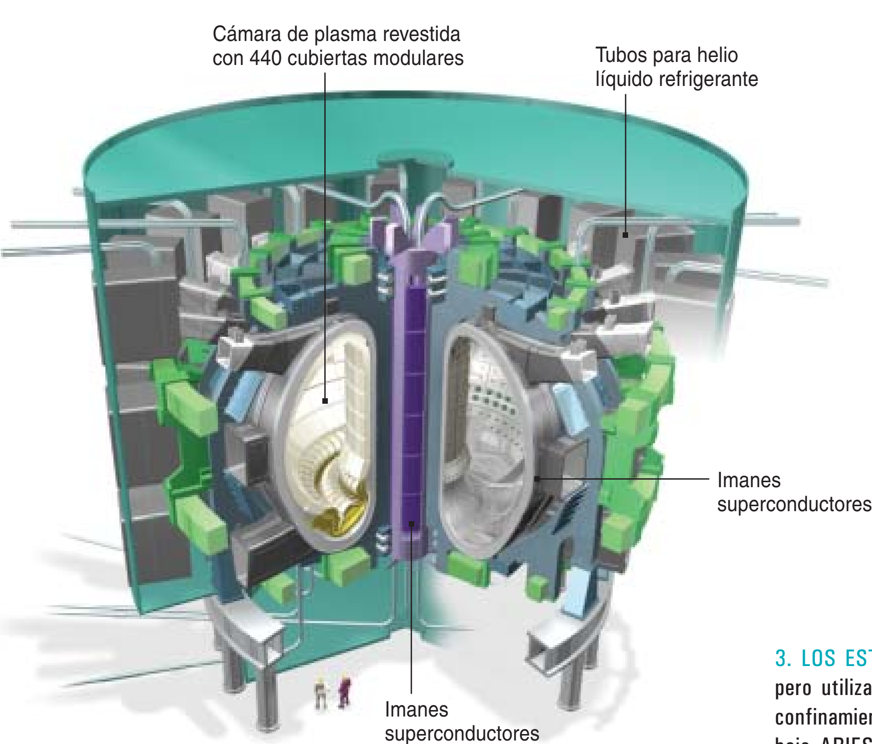
FUSION NUCLEAR

Los físicos hablan de esta energía de combustible inagotable y sin apenas desechos. Pero los políticos, amedrentados por los costes, temen quemarse

Los reactores de fusión, que generan energía por la unión de núcleos atómicos y no por su escisión, encabezan casi todas las listas de técnicas energéticas definitivas para el género humano. Una central de fusión que lograse poner a nuestro servicio la misma fuerza termonuclear que hace arder al Sol, generaría una potencia eléctrica de un gigawatt gastando cada día sólo unos kilos de un combustible muy abundante: isótopos del hidrógeno, que se obtendrían del agua del mar y del litio, metal corriente. El reactor no produciría gases con efecto invernadero; sólo pequeñas cantidades de residuos radiactivos de escasa intensidad, inocuos antes de un siglo. Aun cuando la planta quedase arrasada por un accidente o un ataque, la intensidad de la radiación a un kilómetro de su perímetro sería tan débil, que no se precisaría una evacuación, afirma Farrokh Najmabadi, experto en fusión nuclear que dirige el Centro de Investigación en Energías de la Universidad de California en San Diego.

La duda es si la fusión hará ya una gran aportación al siglo XXI o si no será sólo una solución para el XXII. Según recuerda David E. Baldwin —quien al ser director del grupo de energía de General Atomics tiene a su cargo el mayor de los reactores de fusión experimentales de EE.UU., el DIII-D—, un decenio atrás había todavía científicos que dudaban de que la fusión fuese posible, ni siquiera en el laboratorio. Pero en los últimos veinte años se han conseguido progresos impresionantes en los tokamaks, que se valen de gigantescos electroimanes para confinar el combustible ionizado en el interior de una cámara en forma de toro, donde el plasma se calienta hasta más de 100 millones de grados centígrados.

Aunque se sabe ya que la fusión va a funcionar, asevera Baldwin, todavía se duda de su viabilidad económica. Y en caso de que fuera rentable, se



2. EL REACTOR DE FUSION ITER será el primer tokamak capaz de generar mucha más energía de la que consume, una vez que entre plenamente en funcionamiento a finales del próximo decenio. Los expertos en fusión están planeando ya el reactor que le sucederá, DEMO, del que se pretende que sea la primera planta comercial de generación de electricidad que funcione con la energía de las estrellas.



3. LOS ESTELARADORES funcionan a la manera de los tokamaks, pero utilizan imanes de formas más complicadas, que facilitan el confinamiento del plasma ultracaliente (*en naranja*). El grupo de trabajo ARIES está analizando diseños para un estelarador comercial.

ignora en qué plazo se pasaría de la fase actual, de laboratorio, a la construcción de reactores a escala industrial. Ni siquiera con un programa de choque, vaticina, ello ocurriría antes de 25 o 30 años.

Hasta el momento, los responsables políticos han optado por impulsar la fusión nuclear mucho más tímidamente. Sólo ahora está el ITER (Reactor Experimental Termonuclear Internacional) cerca de su aprobación definitiva, casi 20 años después de la propuesta original. Está previsto que comience a funcionar en el sudeste de Francia hacia 2016. Costará cerca de diez mil millones de euros.

En el ínterin, en India, China y Corea, una generación intermedia de tokamaks cuya construcción está casi terminada servirá para comprobar si los electroimanes superconductores logran que el torbellino de plasma ardiente se mantenga girando de forma estable dentro de su botella magnética durante varios minutos. Los reactores actuales logran estabilizarlo durante unos veinte o treinta segundos como máximo; sus fuentes de alimentación no dan más de sí.

Tres son los principales objetivos del ITER. En primer lugar, tiene que demostrar que un gran tokamak es capaz de controlar la fusión en helio de dos isótopos del hidrógeno —deuterio y tritio— durante el tiempo suficiente para generar diez veces la energía que consume. En segundo lugar, se propone ensayar métodos que permitan utilizar los neutrones rápidos creados en la reacción para engendrar tritio, uno de los combustibles; podría hacerse, por ejemplo, disparándolos contra un recubrimiento de litio. En tercer lugar, se trata de integrar las diversas técnicas necesarias para lograr una central eléctrica basada en la fusión nuclear.

Aunque el ITER tenga éxito, no aportará ni un solo watt a la red eléctrica. Pero sí llevará la fusión nuclear más allá del hito alcanzado por la energía de fisión nuclear en 1942, cuando Enrico Fermi logró la primera reacción en cadena autosostenida. Sólo 11 años después, había ya reactores de fisión impulsando submarinos. Empero, el problema de la fusión es incomparablemente más difícil. Algunos veteranos en este campo pronostican que harán falta 20 o 30 años de experimentación en el ITER para refinar el diseño de una planta de producción.

Najmabadi es más optimista. Encabeza un grupo de trabajo que ha preparado ya tres esbozos de reactores de fusión comerciales. El último, al que han llamado ARIES-AT, sería menos voluminoso —y por consiguiente, exigiría unas inversiones mucho menores— que el ITER. La máquina ARIES-AT debería alcanzar una potencia de 1000 megawatt y generarla a unos 4 céntimos de euro el kilowatt-hora, precio competitivo con el de las centrales actuales de fuel o de gas. Si los trabajos para crear una planta comercial se desarrollasen en paralelo con los del ITER, la fusión no habría de esperar decenios tras la puesta en servicio de éste, sino que podría entrar en la fase de producción comercial a mediados de siglo, sostiene Najmabadi.

La fusión sería todavía más competitiva en el plano económico si los neutrones rápidos producidos por los tokamaks se utilizaran para transmutar torio (más abundante) en uranio (que podría escasear dentro

FACTIBILIDAD 3*

* *Factibilidad técnica estimada, desde 1 (inverosímil) a 5 (apto para el mercado)*

Datos rápidos

Reacción de fusión

Deuterio + Tritio → Helio + Energía + Neutrón

Reactores de fusión de la próxima generación

Proyecto	Lugar	Entrada en servicio
EAST	China	2006
SST-1	India	2006
K-Star	Corea	2008
NIF	EE.UU.	2009
ITER	Francia	2016
NTC	Japón	?

de 50 años), el combustible de las centrales nucleares de fisión. Aunque empañe la limpieza de la energía de fusión, convendría tender hacia híbridos de fisión y fusión, según Hoffert.

VIENTOS DE GRAN ALTITUD

Los vendavales de mayor energía soplan muy por encima de los aerogeneradores actuales. Convendría por eso llevarlos a mayor altura, quién sabe si hasta el chorro estratosférico



4. LOS AUTOGIROS diseñados por Sky WindPower se valdrían de palas propulsadas que rotarían en sentidos opuestos para elevarse a más de 3000 metros. Entraría entonces en modo de generación. El ángulo de ataque de las palas se ajustaría mediante ordenadores para mantener la posición y altitud del artefacto.

El viento es energía solar convertida en movimiento. Alrededor del 5 por mil de la energía lumínica solar que penetra en la atmósfera se transmuta en energía cinética del aire, sólo 1,7 watt de media en toda la columna atmosférica que se alza sobre un metro cuadrado de superficie terrestre. Pero, por fortuna, esa energía no está uniformemente distribuida, sino que se concentra en flujos intensos. Ahora bien, las corrientes más constantes y grandes y de mayor potencia se encuentran a gran altitud. Hoffert estima que unas dos terceras partes de la energía total de los vientos de nuestro planeta residen en la troposfera superior, más allá del alcance de los actuales parques eólicos.

Ken Caldeira, de la Institución Carnegie de Washington, calculó la variación de la potencia del viento en función de la altitud, la latitud y la época del año. En el hemisferio norte, el filón sería la corriente en chorro, a unos 10.000 metros de altitud, en la franja comprendida entre los 20 y 40 grados de latitud. En los cielos de EE.UU., Europa, China y Japón —los países, por otra parte, mejor preparados para explotarla—, la potencia eólica puede ser de hasta 5000 e incluso 10.000 watt por metro cuadrado. La corriente en chorro es errática. Pero no cesa jamás.

Para que el viento aporte terawatts a la producción mundial de energía, habrá que inventar métodos económicamente viables de explotar la corriente en chorro. Hay tres proyectos en marcha de generadores cernidos en el aire.

En Ottawa, Magenn Power piensa poner a la venta un generador rotativo, relleno de helio, que saca partido del efecto Magnus (el que permite marcar gol desde un saque de esquina). Se elevaría, sujeto por una traílla, hasta una altura de unos 120 metros sobre el suelo. El artefacto, que tiene el tamaño de un autobús, enviaría 4 kW a su base en tierra; el precio de venta será de unos 8000 euros, helio no incluido. La compañía espera que hacia 2010 producirá unidades del tamaño de un campo de fútbol que flotarán a mayor altitud y generarán 1,6 MW.

Sky WindPower, de Ramona, en California, sopesó los globos, pero el arrastre parecía imposible de manejar con los vientos de gran altitud. Están pensando en autogiros, que atrapan el viento con rotores de palas. Estas máquinas, si se elevasen hasta los 10.000 metros, generarían regularmente un 90 por ciento de su capacidad máxima. La inconstancia de los vientos de superficie limita el rendimiento de los aerogeneradores terrestres a la mitad de su máximo. Pero a esta casa le ha costado mucho conseguir los casi 4 millones de euros que necesita para un prototipo de 250 kW.

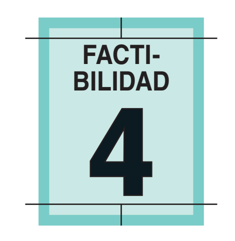
El "aerogenerador en escalera", concebido por el astronauta Wubbo J. Ockels y sus alumnos de la Universidad Técnica de Delft, es de momento sólo una idea. Consistiría en una serie de cometas controladas por ordenador y conectadas por un largo cable. La escalera de cometas sube y baja, con cuyo vaivén impulsa un generador situado en el suelo. Según las simulaciones, una de estas escaleras que subiera hasta el chorro estratosférico daría una potencia de 50 MW.

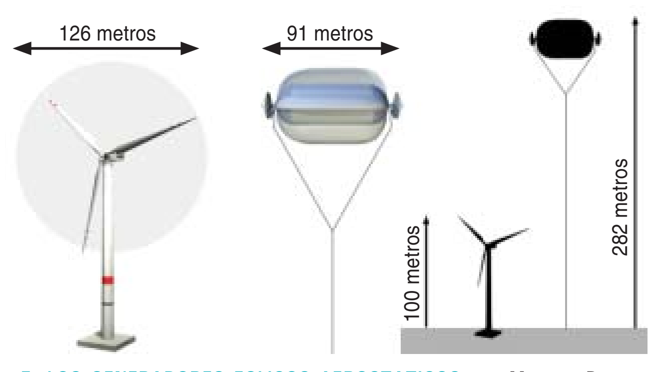
Pero hasta que no se instalen de verdad máquinas a gran altitud, no se podrá saber cómo soportarán las turbulencias, las rachas súbitas y las tormentas eléctricas. Su perdición sería que los costes de mantenimiento resultasen demasiado grandes.

También hay que salvar una serie de obstáculos administrativos. Los parques eólicos aéreos necesitan menos extensión que los terrestres, aunque los técnicos tendrán que conseguir que se impida el tráfico aéreo en su vecindad. Ya existen preceden-

Datos rápidos

- Se espera que en 2014 se haya triplicado la capacidad de generación eólica de electricidad, cifrada hoy en unos 58 gigawatt.
- Los generadores hinchados con helio se tendrían que rellenar cada pocos meses.
- Número de aerostatos anclados con traíllas para vigilar la frontera de los EE.UU. con México: 8.



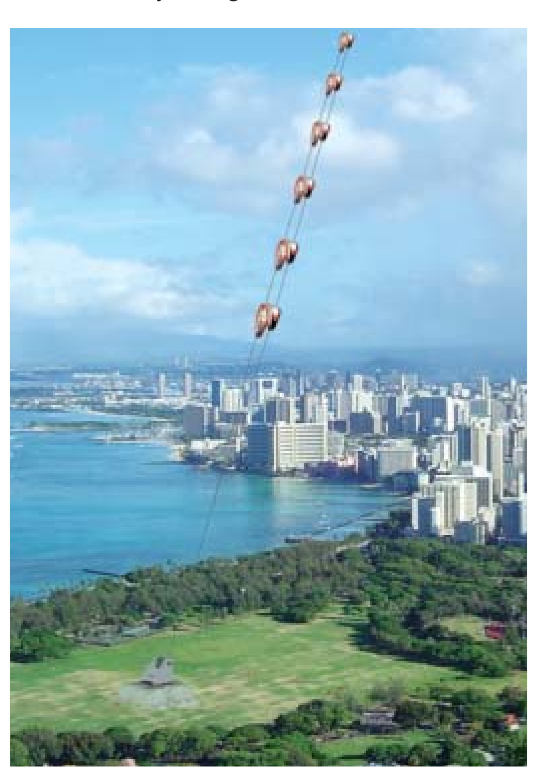


5. LOS GENERADORES EOLICOS AEROSTATICOS que Magenn Power espera tener en servicio en 2010 se elevarían a una altura que vendría a triplicar la de los mayores aerogeneradores actuales, pero su anchura será solamente dos terceras partes de la de éstos.

DON FOLEY; FUENTES: BEN SHEPARD *Sky WindPower Corporation* (*arriba*); MAGENN POWER (*abajo*)

tes: la Fuerza Aérea estadounidense lleva años manteniendo en el aire una docena de grandes aerostatos sujetos por traíllas a lo largo de la frontera con México.

No obstante, en comparación con otras técnicas revolucionarias, la explotación de los vientos a gran altitud parece de las más factibles y benignas.



6. UN SISTEMA EOLICO "en escalera" ensartaría cometas en forma de media luna, velas de parapente o alas sin fuselaje a lo largo de la mitad superior de un cable largo. Cada ala se valdría de sensores y de actuadores que la guiarían e inclinarían durante su ascenso y descenso. Con este sistema, los pesados generadores permanecerían en el suelo.



7. UN ROTOR INFLADO CON HELIO atraparía el viento en cangilones de tela y haría girar generadores sujetos a las traíllas, que conducirían la electricidad a un transformador fijo en el suelo.

ASSET *Universidad Técnica de Delft (arriba, izquierda)*; DON FOLEY *(abajo, izquierda)*; GETTY IMAGES *(arriba, derecha)*; © PARAMOUNT TELEVISION/CORTESIA DE EVERETT COLLECTION *(abajo, derecha)*

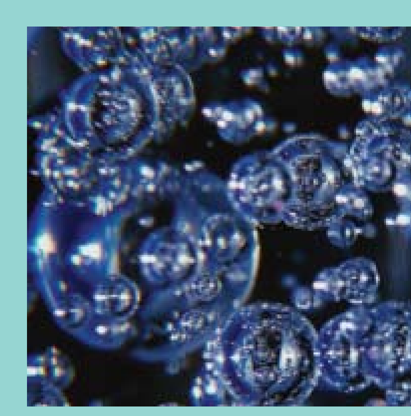
SOLUCIONES DE CIENCIA FICCION

Las visiones futuristas resultan muy entretenidas. Lástima que la física no las respalde



Fusión fría y fusión de burbujas

B. Stanley Pons y Martin Fleischmann provocaron una tormenta en un vaso de agua en 1989 al anunciar que habían logrado la fusión nuclear a temperatura ambiente en un recipiente. La idea les rodeó de una camarilla de obcecados seguidores, pero los científicos ortodoxos han rechazado de plano esa variedad de fusión fría.



1. Las burbujas siguen reventándose.

Teóricamente más verosímil, pero todavía en entredicho desde un punto de vista experimental, es la sonofusión. En 2002, Rusi Taleyarkhan, adscrito por entonces al Laboratorio Nacional de Oak Ridge, informó en *Science* de que al dirigir un haz de ultrasonidos de gran intensidad parejamente con un haz de neutrones a una cuba de acetona se formaban burbujas microscópicas que hacían implosión a velocidades hipersónicas. La acetona se había sintetizado con deuterio (un isótopo de hidrógeno que posee un neutrón) y el grupo de Taleyarkhan aseguraba que las extraordinarias presiones y temperaturas que se creaban en la implosión de las burbujas forzaban a los átomos de deuterio a fusionarse con los neutrones incidentes, formándose tritio (hidrógeno con dos neutrones por núcleo). Otro grupo de Oak Ridge reprodujo el experimento, pero no apreció signos de fusión.

Taleyarkhan se trasladó a la Universidad Purdue y siguió informando de éxitos a pesar de que otros que intentaron repetir su experimento fracasaron. Este año, la universidad se ha visto obligada a investigar las acusaciones de que Teleyarkhan había estado obstaculizando trabajos que parecían contradecir los suyos. Los resultados de estas averiguaciones han sido guardados bajo siete sellos, y con ellos, otro capítulo de la historia de la fusión fría. Hay investigadores que siguen alentando la esperanza de que métodos diferentes puedan algún día inaugurar una nueva página en la sonofusión.

Reactores de materia y antimateria

La nave *Enterprise* obtenía la energía que necesitaba para distorsionar el hiperespacio de una mezcla de materia y antimateria. No hay duda de que se trata de una potente combinación: un kilogramo de una y otra liberaría, en su mutua desintegración, tanta energía como toda la gasolina quemada en los EE.UU. en 2005. Pero no se conocen fuentes naturales de antimateria; tendríamos que sintetizarla. La fábrica de antimateria más eficiente que existe es el acelerador de partículas del CERN, cerca de Ginebra. Pues bien: tendría que funcionar sin pausa durante cien millones de años para producir un kilo de antiprotones.



2. Sólo la *Enterprise* tiene materia y antimateria suficientes.

Aunque se dispone de formas de capturar antiátomos [*véase* "Creación de antimateria fría", por Graham P. Collins; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto, 2005], las centrales eléctricas de antimateria quizá no lleguen nunca a existir.

ENERGIA SOLAR DESDE EL ESPACIO

En órbita, donde el Sol brilla sin cesar y con todo su fulgor, los paneles fotovoltaicos desarrollarían por completo su capacidad. Pero hay un inconveniente

Cuando Peter Glaser propuso en 1968 que se cosechara la energía solar en el espacio profundo mediante satélites del tamaño de una ciudad y se la radiase a la Tierra en forma de microondas invisibles, pareció una idea descabellada, por mucho que Glaser presidiese la Sociedad Internacional de Energía Solar. Pero cuando la crisis del petróleo de hace 30 años disparó los precios del combustible, los ingenieros de la NASA decidieron examinar la propuesta. Juzgaron que, en lo que se refería a los aspectos técnicos, era factible. Hasta que en 1979 calcularon el "costo al primer watt": unos 305.000 millones de dólares (del año 2000). Ahí acabó el proyecto.

Desde aquellos tiempos, las técnicas espaciales y fotoeléctricas han avanzado a grandes zancadas. La energía solar espacial (ESE) no carece hoy de paladines. Hoffert cita dos grandes ventajas de esas estructuras espaciales con respecto a sus hermanas ancladas al suelo. En una órbita geoestacionaria, bien apartada de la sombra y de la atmósfera terrestres, la intensidad media de la luz solar es ocho veces la del suelo. Y por estar el Sol siempre en su punto de mira, las estaciones ESE inyectarían una cantidad constante y fiable de energía en la red eléctrica. (Una antena rectificadora, o "rectena", extendida sobre varios kilómetros cuadrados de terreno, convertiría las microondas en corriente eléctrica con una eficiencia del 90 por ciento, aunque estuviera cubierta por nubes.)

La ESE sería una fuente de electricidad auténticamente sostenible, válida a escala planetaria, del todo carente de emisiones y, sostiene Hoffert, con una relación entre coste y rendimiento y una viabilidad técnica que superarían las de la fusión termonuclear. A pesar de ello, apenas si se da dinero para investigar la energía solar espacial; en cambio, acaba de aprobarse un reactor de fusión que costará diez mil millones de dólares.

La verdad es que la NASA sí ha costeado algunos pequeños estudios, entre 1995 y 2003. Evaluó con ellos diversos componentes y arquitecturas para la ESE. Se utilizaron en esos estudios células fotovoltaicas de película delgada para la generación de electricidad, elementos superconductores de alta temperatura para transportarla y láseres infrarrojos (en lugar de haces de microondas) para dirigirla a las estaciones terrestres. Estas innovaciones aligerarían muchísimo los sistemas y reducirían, en consecuencia, el formidable costo de situarlos en órbita.

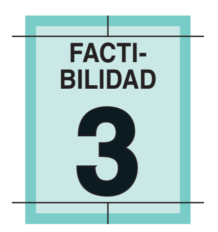
Pero aquí está el inconveniente: la relación entre la potencia generada y la masa en órbita sigue siendo demasiado baja, apenas unos cientos de watt por kilogramo. Mientras no aumente, la ESE nunca competirá en precio con otras energías renovables, ni siquiera teniendo en cuenta los sistemas de almacenamiento que éstas precisan para cubrir las noches o las rachas de mal tiempo.

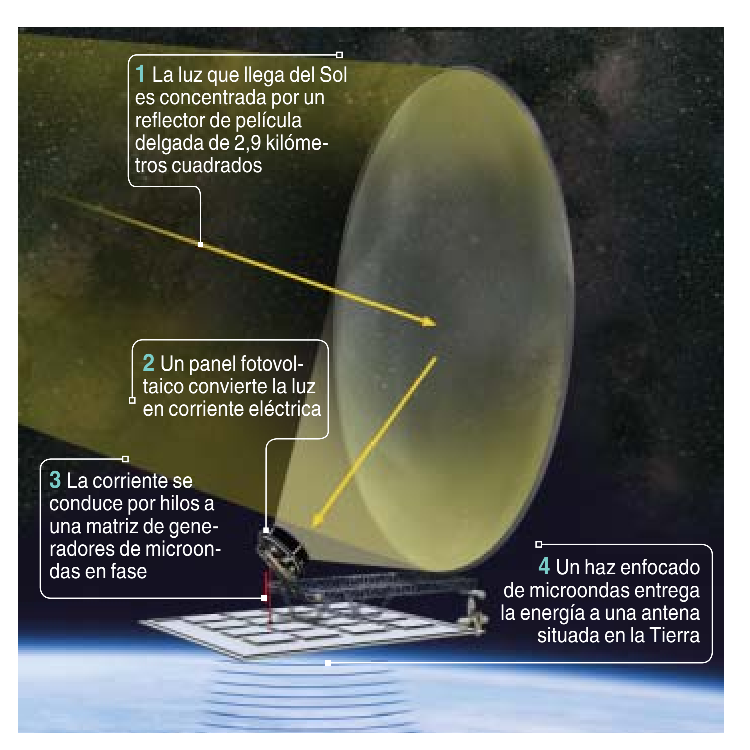
A pesar de todo, puede que los avances técnicos no tarden en cambiar la situación. Se están preparando materiales fotovoltaicos más ligeros o más eficientes. Un equipo de la Universidad de Neuchâtel acaba de informar de una nueva técnica, que deposita células de silicio amorfo sobre una película que resistiría las condiciones espaciales y generaría densidades de potencia de hasta 3200 watt por kilogramo. Aunque tal resultado sea esperanzador, en la estructura portante y en la gestión de la energía se esconden las dificultades, según John C. Mankins, que dirigió el programa ESE de la NASA desde 1995 hasta 2003. Mankins considera más prometedores los sistemas avanzados de transporte espacial de tierra a órbita, todavía en el tablero de diseño, que podrían recortar en los decenios venideros los gastos de lanzamiento desde los 10.000 euros por kilogramos actuales hasta unos pocos centenares de euros por kilo.

La agencia japonesa del espacio, JAXA, anunció el año pasado que en 2010 lanzará un satélite que desplegará un gran panel solar y radiará 100 kW, en forma de microondas o de láser, a una estación

Contrapartidas

- Para ensamblar las gigantescas matrices de células solares tendrían que trabajar coordinadamente grandes equipos de robots.
- Los haces de microondas podrían interferir con los sistemas de comunicaciones.
- Las agencias espaciales tendrían que multiplicar por 80 sus lanzamientos.
- La "rectenas" ocuparían grandes extensiones de terreno.





8. UN GIGANTESCO COLECTOR SOLAR, en órbita geosincrónica, funcionaría día y noche, y con cualquier tiempo. Una planta piloto del tamaño de la representada interceptaría alrededor de 4 gigawatt de luz solar, los convertiría en 1,8 GW de microondas y entregaría 1,1 GW de electricidad a la red eléctrica.

DON FOLEY

receptora en tierra. A más largo plazo, hacia 2020, quiere poner en órbita un prototipo de 250 MW, que servirá de preparación para una planta ESE con una potencia de gigawatt destinada a un uso comercial.

La NASA dispuso otrora de diseños no menos ambiciosos, pero detuvo los trabajos sobre ESE hace dos años, al considerar prioritaria la exploración del espacio.

CELULAS SOLARES NANOTECNICAS

Materiales conformados a escala atómica podrían multiplicar los rendimientos fotovoltaicos, muy pobres hasta ahora

Cinco gigawatt, un miserable 0,038 por ciento de la energía total que el mundo consume. Esa es, aproximadamente, la capacidad acumulada de los sistemas de electricidad fotovoltaica instalados en el mundo, transcurrido medio siglo desde que empezó la comercialización de las fotocélulas. En cuanto a grandes promesas incumplidas, la energía eléctrica solar carece de rival.

Mas aunque las estaciones en órbita no lleguen nunca a alzar el vuelo, parece que la nanotecnia está decidida a rescatar a la energía solar de su perenne irrelevancia. Se trabaja en un amplio abanico de materiales muy superiores al silicio que se utiliza en casi todas las células fotovoltaicas; mejorarían su eficiencia y disminuirían su coste.

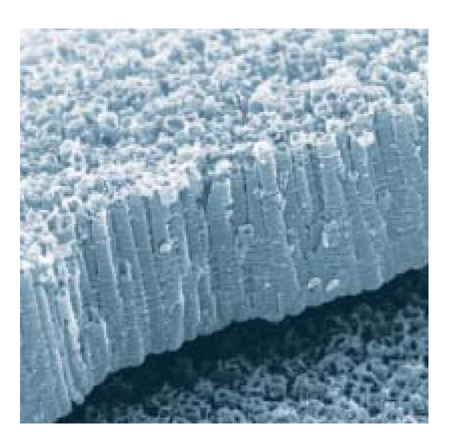
Las más perfectas (y costosas) células de silicio de segunda generación alcanzan un rendimiento que ronda el 22 por ciento. Nuevos materiales dotados de puntos cuánticos duplicarán ese valor, si los descubrimientos anunciados el pasado mes de marzo evolucionan de acuerdo con lo esperado. Los puntos cuánticos, de diámetros del orden del nanómetro (10^{-9} metros) fueron creados por grupos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables en Colorado y del Laboratorio Nacional de Los Alamos en Nuevo México.

Cuando la luz solar incide en una célula de silicio, se convierte casi por completo en calor. En el mejor de los casos, puede que un fotón arranque de ella un electrón. Los puntos cuánticos permiten que una gama más amplia de longitudes de onda presten trabajo útil y lleguen a arrancar hasta siete electrones por fotón. Pero la mayoría de tales electrones vuelven a quedar atrapados en el material, por lo que se buscan mejores métodos de canalizarlos hacia los hilos conductores. También se están buscando materiales menos agresivos para el entorno que el plomo, el selenio y el cadmio que se utilizan en los nanocristales de hoy. Aunque su nombre suene a técnica muy avanzada, no resulta caro fabricar puntos cuánticos.

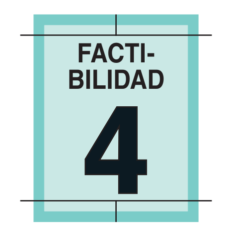
Hay otro tipo de nanopartículas que promete abaratar la energía solar. No lejos de San Francisco, la compañía Nanosolar está construyendo una fábrica de la que saldrán 200 millones de células solares al año, creadas imprimiendo diminutas piezas de diseleniuro de galio, indio y cobre en bobinas continuas de película ultrafina. Las partículas se autoensamblan en estructuras recolectoras de luz. El presidente de Nanosolar afirma que aspira a reducir el costo hasta unos 40 céntimos de euro por watt.

Dato esencial

50 céntimos: el precio de una célula solar de 1 W ha de bajar de este precio



9. ESTOS NANOTUBULOS DE TITANIO creados en la Universidad estatal de Pennsylvania multiplican por 10 la luz que recogen las células solares de silicio.



El rumor ha despertado a los gigantes de la energía. En la actualidad, Shell cuenta ya con una filial que fabrica células solares, y British Petroleum lanzó en junio, con el Instituto de Tecnología de California, un proyecto de cinco años de duración. Su objetivo: lograr células solares de gran rendimiento a partir de nanovarillas de silicio.

UNA SUPERRED ELECTRICA GLOBAL

Las fuentes energéticas revolucionarias necesitan una red eléctrica de superconductores, no menos revolucionaria, que cubra el planeta

Un problema básico de las fuentes de energías renovables es el acoplamiento de la oferta y la demanda, como señala Hoffert. El suministro de luz solar, viento, oleaje e incluso de vegetales para los biocombustibles fluctúa de modo impredecible; además, tienden a concentrarse donde apenas existe población. Una solución



10. ITINERARIO DE LA RED ELECTRICA planetaria propuesto en 1981 por Buckminster Fuller. Conectaría todos los territorios poblados y eludiría largas travesías oceánicas.

MAGGIE PAULOSE *Universidad Estatal de Pensilvania (arriba)*; LUCY READING-IKKANDA *(abajo)*

sería construir líneas de conducción a larga distancia con cables superconductores. Una vez enfriados hasta las cercanías del cero absoluto, transportarían corrientes ingentes a lo largo de enormes distancias con pérdidas casi nulas.

En julio pasado, el grupo BOC de Nueva Jersey y sus socios comenzaron a instalar 350 metros de cable superconductor en la red eléctrica de Albany, estado de Nueva York. Este enlace, refrigerado con nitrógeno líquido, transportará hasta 48 MW de electricidad a 34.500 volt.

En un seminario celebrado en 2004, los expertos esbozaron diseños para una "superred" que transportaría simultáneamente electricidad e hidrógeno. El hidrógeno, tal vez licuado, o en forma gaseosa ultrafría, enfriaría los hilos superconductores y alimentaría pilas de combustible y motores de combustión [*véase* "Una red de energía para la economía del hidrógeno", por Paul M. Grant, Chauncey Starr y Thomas J. Overbye; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 2006].

Con una superred transcontinental, los extensos territorios, idóneos para la energía fotovoltaica, de Australia y los parques eólicos de Siberia entregarían electricidad para los acondicionadores de aire de los EE.UU. o para la iluminación en Europa. Pero la construcción de estas infraestructuras sería labor de varias generaciones y costaría billones de euros.

OLAS Y MAREAS

El mar, con su oleaje y sus mareas, ofrece enormes recursos energéticos, hoy casi intactos. Las compañías eléctricas se preparan para explotarlos

Ha cambiado de sentido el viento para el sueño de explotar el incesante movimiento del mar. En expresión de Roger Bedard, que dirige la sección de energía marina del Instituto de Investigaciones de la Energía Eléctrica, la energía de los océanos, que lleva un retraso de por lo menos veinte años con respecto a la eólica, no va a tardar otros veinte en ponerse a su par.

Durante los años ochenta y noventa del pasado siglo, quienes abogaban por el aprovechamiento de olas y mareas sólo podían exhibir dos éxitos comerciales: una planta mareomotriz de 240 MW en Francia y otra de 20 MW en Nueva Escocia. Ahora añade China una instalación de 40 kW en Daishan. Pronto empezarán a girar seis turbinas, de 36 kW cada una, en el East River de Nueva York. Frente a Aguçadoura, en Póvoa de Varzim, cerca de Oporto, acaba de empezar a operar el primer parque comercial que explota la energía de las olas.

De los proyectos en estudio, el plan más ambicioso corresponde a Gran Bretaña. Los analistas piensan que la energía del mar podría llegar a suministrar una quinta parte de la energía eléctrica del país; le permitiría cumplir sus obligaciones como firmante del protocolo de Kioto. El pasado mes de julio, el gobierno británico ordenó un estudio de factibilidad de un dique de 16 kilómetros que cerraría el estuario del Severn, cuyas mareas son las segundas en magnitud del mundo. Esta barrera del Severn costaría unos 20.000 millones de euros y produciría 8,6 GW con el vaivén de las mareas. Quienes defienden esta instalación afirman que podría estar en servicio durante cien años o más.

Los grupos ambientalistas advierten de que la barrera tendría efectos catastróficos en el ecosistema del estuario. Mejor que un dique, razona Peter Fraenkel, de Marine Current Turbines, serían parques de las turbinas SeaGen que su compañía ha desarrollado. Si la costa del Reino Unido estuviera orlada de esos sistemas mareomotores, generaría tanta electricidad como el dique del Severn con menor inversión de capital, menor variación en la potencia generada y menor impacto ambiental.



11. EL PARQUE MAREOMOTOR proyectado por Marine Current Turbines estaría formado por una serie de turbinas más cercanas entre sí que los generadores eólicos. Los rotores, de 20 metros de diámetro, se sumergerían para extraer energía de las corrientes de la marea, pero subirían a la superficie para los trabajos de mantenimiento.

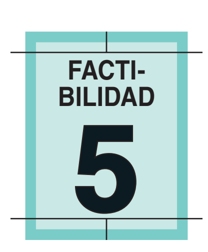
12. LOS DISPOSITIVOS que aprovechan la energía de las olas, como los construidos por Ocean Power Delivery, generan electricidad a partir de los movimientos de flexión de sus articulaciones al pasar las olas por debajo de ellos. Como se zambullen en las olas que les llegan, las máquinas Palamis soportarían la bravura del oleaje que acompaña a las fuertes galernas.



Ya en marcha

Proyectos de energía mareomotriz y del oleaje:

- Rhode Island (EE. UU.): 500 kW en 2006
- Irlanda del Norte: 1 MW a finales de 2006
- Santoña: 1,25 MW en 2007
- Motrico: 480 kW en 2007
- Aguaçadoura, en Portugal: 24 MW en 2007
- Cornualles, en Gran Bretaña: 5 MW en 2008
- Northern Devon, en Gran Bretaña: 10 MW en 2010
- Daishan, en China: 120 a 150 kW. Sin fecha anunciada



OCEAN POWER DELIVERY (*arriba*); MARINE CURRENT TURBINES TM LTD. (*abajo*)

Las afirmaciones de Fraenkel serán sometidas a una pequeña prueba por el generador mareomotor que la compañía instala en Strangford Lough, con capacidad para suministrar una potencia media de 540 kW a la red eléctrica de Irlanda del Norte. La máquina viene a ser una turbina eólica submarina, con dos rotores que comparten un mismo mástil anclado en el lecho marino.

La máxima ventaja de la energía de las mareas estriba en su carácter predictible, aunque a escala planetaria su contribución nunca será muy grande: los lugares donde las mareas se mueven a suficiente velocidad escasean demasiado.

Las olas de gran energía son más caprichosas, pero también más ubicuas. Según un análisis del grupo de Bedard, bastaría con que parques de oleaje con un rendimiento del 50 por ciento aprovechasen el 20 por ciento de las olas económicamente explotables de las costas de los EE.UU. para que la energía producida superase la generada hidroeléctricamente en el país.



PETER ESSICK *Aurora/Getty Images*

13. CHARCAS CON CUBIERTAS DE INVERNADERO, parecidas a las del lago del proyecto Biosfera 2, podrían algún día servir para el cultivo de nuevos microorganismos, plantas o algas diseñados para generar hidrógeno, secuestrar el dióxido de carbono o producir biocombustibles.

MICROORGANISMOS DE DISEÑO

En ingeniería genética se cree posible la creación de seres sintéticos mediante los cuales se cultive energía con la misma facilidad con que hoy se cultivan alimentos

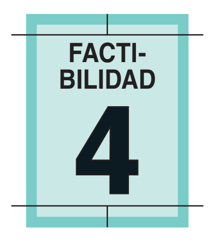
“Vemos el genoma como el programa, o incluso el sistema operativo, de la célula”, dijo J. Craig Venter a los biólogos reunidos en el congreso de Biología Sintética 2.0, de mayo de 2006. Ya es hora de una actualización, les propuso. Muchos de los allí presentes proyectan remodelar genéticamente ciertos organismos hasta el punto de que las células resultantes bien podrían calificarse de especies sintéticas. Venter, que logró fama y fortuna con los métodos que contribuyó a crear para la secuenciación veloz del genoma humano, ha fundado Synthetic Genomics, empresa que comercializará células construidas sobre pedido. Cree que ese campo cuenta con muchas posibilidades para reemplazar a la industria petroquímica, tal vez en el plazo de 10 años.

Ese lapso quizá sea exageradamente optimista; nadie ha logrado todavía ensamblar una sola célula partiendo de cero. Pero Venter informó de los rápidos progresos de su equipo en su empeño por crear cromosomas artificiales. Contendrían el mínimo de genes precisos para lograr una vida que se mantenga por sí misma en un ambiente controlado y rico en nutrientes. Pronostica que la primera célula procariota (sin núcleo) se obtendrá en los dos años próximos y que los genomas eucariotas sintéticos (de células nucleadas) estarán disponibles en diez años, como máximo.

Venter imagina nuevos microorganismos que capturarán dióxido de carbono de la chimenea de una central térmica y lo convertirán en gas natural para la caldera. Al fin y al cabo, aduce, existen ya en nuestro planeta millares, millones tal vez, de organismos que saben hacerlo. Aunque ninguna de estas especies pueda vivir en una central eléctrica, se podrían tomar de ellas sus circuitos genéticos para crear seres nuevos. Trata también de construir sistemas biológicos que produzcan hidrógeno directamente gracias a la luz solar, mediante fotosíntesis.

Dato esencial

50.000 litros: de biogasóleo por hectárea de granja de algas donde se inyecte CO_2



Steven Chu, director del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, ha anunciado un gran proyecto que convertiría la energía del sol en combustibles para el transporte. Con los medios de la ingeniería genética, sostiene Chu, se podrían modificar plantas y algas para que se autofecunden y resistan sequías y plagas. Los nuevos cultivos ofrecerían altos rendimientos de celulosa, que sería transformada en combustible por microorganismos de factura humana. Chu espera que los procesos biológicos resulten mucho más eficientes que los procedimientos energéticamente intensivos, como la explosión de vapor o la hidrólisis térmica, utilizados en la actualidad para fabricar etanol.

Con precios del petróleo cercanos a los 80 dólares por barril, es posible que el bioprocesado no tenga que esperar a formas de vida sintéticas. La firma GreenFuel, de Cambridge, en Massachusetts, ha instalado granjas de algas en las centrales térmicas con el fin de convertir hasta el 40 por ciento del CO_2 que vomitan en materias primas para biocombustibles. Esta empresa afirma que un gran cultivo de algas vecino a una central de 1 GW produciría hasta 200.000 metros cúbicos anuales de etanol.

Bibliografía complementaria

PROCEEDINGS OF THE HYDROKINETIC AND WAVE ENERGY TECHNOLOGIES TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ISSUES WORKSHOP, Washington D.C., 26-28 de octubre de 2005.

URSI WHITE PAPER ON SOLAR POWER SATELLITES. International Union of Radio Science, noviembre de 2005.

BIOLOGÍA SINTÉTICA. David Baker et al. en *Investigación y Ciencia*, agosto de 2006.

Bioetanol

Este alcohol, producido a partir de la caña de azúcar, la remolacha o los cereales, ofrece al sector del transporte una opción energética sostenible. Su fabricación a partir de material lignocelulósico aportaría más ventajas a ese recurso

Mercedes Ballesteros Perdices

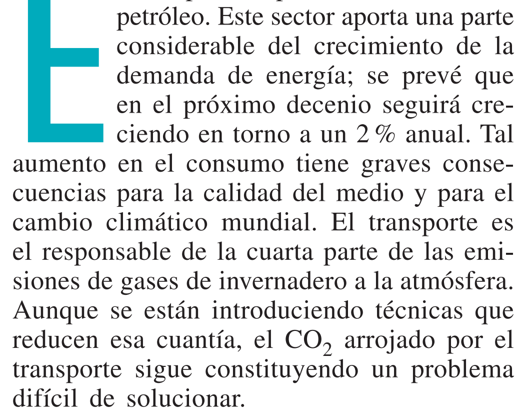
RESUMEN

■ El transporte depende del petróleo. Una posible escasez futura de este combustible, el aumento de su precio y su contribución al calentamiento global aconsejan diversificar las fuentes de energía utilizadas por los medios de transporte.

■ La obtención de carburantes a partir de la biomasa vegetal es una de las principales opciones para esa diversificación. El bioetanol es, con mucha diferencia, el biocarburante más utilizado en el mundo

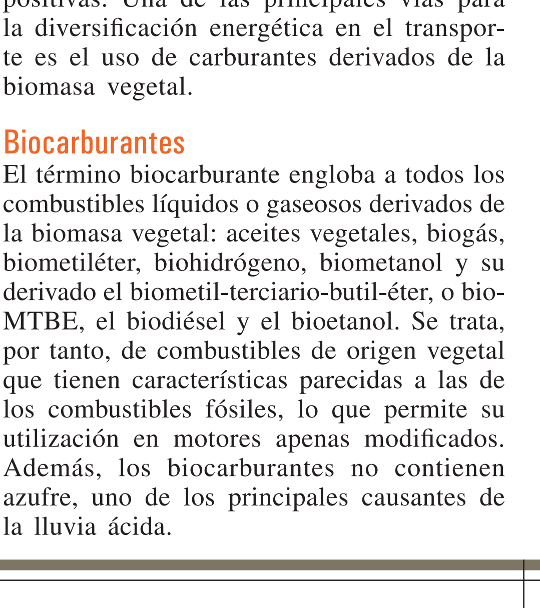
■ La producción de biocarburantes a partir de la masa lignocelulósica podría mejorar decisivamente su competitividad.

El transporte depende en un 98 % del petróleo. Este sector aporta una parte considerable del crecimiento de la demanda de energía; se prevé que en el próximo decenio seguirá creciendo en torno a un 2 % anual. Tal aumento en el consumo tiene graves consecuencias para la calidad del medio y para el cambio climático mundial. El transporte es el responsable de la cuarta parte de las emisiones de gases de invernadero a la atmósfera. Aunque se están introduciendo técnicas que reducen esa cuantía, el CO_2 arrojado por el transporte sigue constituyendo un problema difícil de solucionar.



Dado que la movilidad que proporciona el transporte es esencial para el desarrollo económico y el bienestar social, deben buscarse soluciones que reduzcan sus efectos negativos sin mermar sus contribuciones positivas. Una de las principales vías para la diversificación energética en el transporte es el uso de carburantes derivados de la biomasa vegetal.

Biocarburantes



El término biocarburante engloba a todos los combustibles líquidos o gaseosos derivados de la biomasa vegetal: aceites vegetales, biogás, biometiléter, biohidrógeno, biometanol y su derivado el biometil-terciario-butil-éter, o bio-MTBE, el biodiésel y el bioetanol. Se trata, por tanto, de combustibles de origen vegetal que tienen características parecidas a las de los combustibles fósiles, lo que permite su utilización en motores apenas modificados. Además, los biocarburantes no contienen azufre, uno de los principales causantes de la lluvia ácida.

La producción de biocarburantes puede también generar beneficios económicos, crear más empleo, reducir las facturas de las importaciones de energía y abrir nuevos mercados potenciales de exportación en numerosos países en vías de desarrollo.



Para que los biocarburantes de origen agrícola constituyan una opción energética real, no basta con que presenten características equivalentes a los de procedencia fósil. Han de llegar al mercado a un coste similar al de los derivados del petróleo reemplazados. Y se necesita que en el conjunto de los procesos de obtención se consigan balances energéticos positivos. A pesar de que la producción de buena parte de los biocarburantes resulte hoy más cara que la de los combustibles fósiles, su utilización se está incrementando en todo el mundo por las ventajas que reportan.

El sector mundial de los biocarburantes está constituido básicamente por el biodiésel y el bioetanol. El biodiésel se obtiene a partir de aceites vegetales procedentes de plantas oleaginosas. Se aplica en motores diésel; sustituye al gasóleo de automoción o se mezcla con él, casi en cualquier proporción. El bioetanol se obtiene por fermentación de medios azucarados extraídos a partir de caña de azúcar, remolacha, maíz, trigo y cebada. Tras la fermentación se forma un mosto con un grado alcohólico en torno al 10 %-15 %, que se concentra por destilación para la obtención del "alcohol hidratado" (4-5 % de agua) o para la consecución de alcohol absoluto (99,4 % min. de riqueza), luego de un proceso específico de deshidratación. El alcohol absoluto se mezcla con gasolina en vehículos corrientes.

El bioetanol, como combustible de transporte, se utiliza de diferentes formas; por ejemplo, mezclado con gasolina en bajos porcentajes (menores del 5-10 %). Los alcoholes aumentan el contenido de oxígeno de la gasolina y, con ello, su octanaje. Así arde mejor y mejoran las prestaciones del vehículo sin que haya que modificar los motores, al mismo tiempo que se reducen el consumo y las emisiones contaminantes. La mezcla al 10 por ciento recibe el nombre de "gasohol". El etanol desempeña un papel de aditivo oxigenado de modo indirecto: en forma de ETBE (etil-terciario-butil-éter), que se fabrica a partir de una mezcla de etanol e isobuteno.

Se mezcla también el etanol con la gasolina en porcentajes desde el 10 al 85 %, pero requiere que se efectúen

1. PLANTA de biocarburantes de Castilla y León, en Babilafuente, Salamanca, que ha entrado en funcionamiento en 2006. Producirá etanol a partir del grano de cereal y de la paja. Los alcoholes obtenidos a partir de materiales lignocelulósicos podrían reducir mucho la contribución del transporte al aumento del dióxido de carbono acumulado en la atmósfera.

MERCEDES BALLESTEROS PERDICES





2. LA MATERIA VEGETAL es una de las principales fuentes alternativas de energía para el transporte. El aceite de la mostaza etíope (*Brassica carinata*) se emplea para producir biodiésel. Esta especie se halla mejor adaptada a determinadas zonas mediterráneas semiáridas que la colza, cuyo aceite se utiliza con mayor frecuencia que el de la mostaza para la obtención de biodiésel.

MERCEDES BALLESTEROS PERDICES

modificaciones en los vehículos. El E-85 es un combustible que contiene hasta el 85 % de etanol y sólo un 15 % de gasolina; se utiliza en los vehículos de combustible flexible (FFV). Los vehículos FFV están diseñados para consumir indistintamente gasolina o mezclas en cualquier porcentaje, hasta un máximo de etanol del 85 %. Van equipados con un sensor de combustible que detecta la proporción de etanol y gasolina; adapta los sistemas de inyección e ignición a las características de la mezcla.

Por último, el etanol puede mezclarse con un aditivo para mejorar la ignición. Se utiliza esta mezcla en motores diésel especialmente configurados para ese propósito.

Estado actual de desarrollo del bioetanol

En la actualidad el bioetanol es, con mucha diferencia, el biocarburante más utilizado. En 2004 se produjeron en el mundo alrededor de 30.000 millones de litros de bioetanol para combustible, lo que representa en torno al 2 % del consumo mundial de petróleo.

Brasil es el mayor productor y consumidor mundial de etanol. En respuesta a la crisis del petróleo de comienzos de los setenta, el gobierno brasileño creó el programa PROALCOOL con el objetivo de aumentar la producción de alcohol de caña de azúcar destinado a sustituir a la gasolina. En sus inicios el programa fomentó, mediante políticas de beneficios económicos e incentivos fiscales, la sustitución de los vehículos de gasolina por vehículos de etanol hidratado. A finales de los años ochenta y comienzo de los noventa, el descenso en los precios del crudo hizo el mercado del bioetanol menos atractivo y el gobierno redujo las subvenciones. En 1989 acabó el programa de incentivos. Desde entonces, el etanol se ha empleado mezclado con gasolina. Brasil cuenta con un parque automovilístico de más de 2 millones de vehículos adaptados para funcionar con bioetanol y 16 millones que utilizan mezclas de etanol y gasolina con un porcentaje de etanol que oscila entre el 22 y el 25 %. La extensión dedicada al cultivo de caña de azúcar en los últimos años está aumentando de manera considerable para hacer frente a la demanda interior y exterior, en fase de expansión.

En Estados Unidos, el bioetanol producido a partir de maíz se utiliza desde la entrada en vigor en 1978 de la Ley del Impuesto de la Energía, que introdujo incentivos fiscales para su extracción. No obstante, el verdadero impulso al mercado del bioetanol tiene su origen en la prohibición de añadir a la gasolina MTBE, impuesta en algunos estados del país (California y Nueva York, desde 2004). La razón de la prohibición reside en la contaminación de pozos de agua que causa ese aditivo oxigenado, obtenido a partir de una mezcla de metanol e isobutileno.

Se adoptó el etanol como sustituto del MTBE porque permite mantener las especificaciones de la gasolina reformulada en lo que respecta al contenido en oxígeno. En mayo de 2006 se suprimió la obligación de que la gasolina reformulada esté oxigenada. La capacidad de producción de etanol en Estados Unidos, cifrado hoy en 10.000 millones de litros, está experimentando una expansión sin precedente; se acerca rápidamente a las cifras brasileñas. Por lo que con-

cierne a la Unión Europea, todavía queda un gran camino que recorrer para aproximarse a la producción de Brasil y Estados Unidos. Las actuales especificaciones de las gasolinas sin plomo permiten la adición directa de un máximo del cinco por ciento (en volumen) y exigen un etiquetado específico en los puntos de venta para porcentajes mayores. En 2004 se produjo en Europa medio millón de toneladas, lo que supuso un 10 % de la producción mundial de bioetanol. Hasta el año 2000, Francia fue el mayor productor de bioetanol de la Unión Europea; desde 2002 lo es España. Suecia importa el 80 % del bioetanol consumido, principalmente de Brasil.

En la Unión Europea se están adoptando una serie de medidas de apoyo a la producción y utilización de biocarburantes. La Directiva 2003/30, del Parlamento Europeo y del Consejo para el fomento del uso de biocarburantes en el sector del transporte, instaba a los estados miembros a que tomasen las medidas necesarias para que en el año 2005 un mínimo del 2 % del combustible para el transporte vendido en su territorio consistiese en biocarburantes.

Esta cantidad aumenta progresivamente, de manera que la sustitución alcance el 5,75 % en el año 2010. Si no se arbitran medidas de ahorro energético, las previsiones indican que en el año 2010 se consumirán en Europa unos 304 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) en el sector del transporte, y la contribución prevista de biocarburantes en ese año debería estar en torno a los 17,5 Mtep. La Directiva 2003/30/CE, junto con el artículo 16 de la Directiva 2003/96/CE, que reestructura el marco impositivo de los productos energéticos y permite exonerar de impuestos especiales a este tipo de biocarburantes, abre la puerta al desarrollo de los mismos. Permitirá a la Unión Europea crear un mercado de biocarburantes competitivo.

La Comisión Europea acaba de adoptar una ambiciosa estrategia para los biocarburantes (COM 2006 34). El documento, que viene a sumarse al Plan de Acción sobre la Biomasa adoptado en diciembre de 2005 (COM 2005 628), se fija tres metas principales: promover los biocarburantes tanto en la Unión Europea como en los países en vías de desarrollo; preparar el terreno para su uso a gran escala, mejorando su competitividad en cuanto al coste e incrementando la investigación sobre combustibles de "segunda generación"; y apoyar a los países en vías de desarrollo en los que la producción de biocarburantes podría estimular el crecimiento económico sostenible. Extender su uso reduciría la dependencia de Europa de las importaciones de combustibles fósiles, proporcionaría nuevas salidas a los agricultores y abriría nuevas posibilidades económicas en varios países del Tercer Mundo y podría aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero.



3. ETAPAS DEL PROCESO de extracción de etanol a partir de materias primas azucaradas.

MERCEDES BALLESTEROS PERDICES

En España, el Plan de Energías Renovables 2005-2010 considera la producción de un total de 2.250.000 tep de biocarburantes en el año 2010. Los biocarburantes gozan de una exención total sobre impuestos especiales.

Existen en nuestro país dos plantas de producción de etanol, Ecocarburantes Españoles y Bioetanol Galicia, con una capacidad de producción de 80.000 y 100.000 toneladas al año, respectivamente. Las refinerías españolas con capacidad de producción de MTBE han realizado las modificaciones oportunas en sus instalaciones para poder utilizar etanol en vez de metanol en la formulación del aditivo. En todas ellas se produce ETBE con el bioetanol que suministran las dos plantas en funcionamiento.

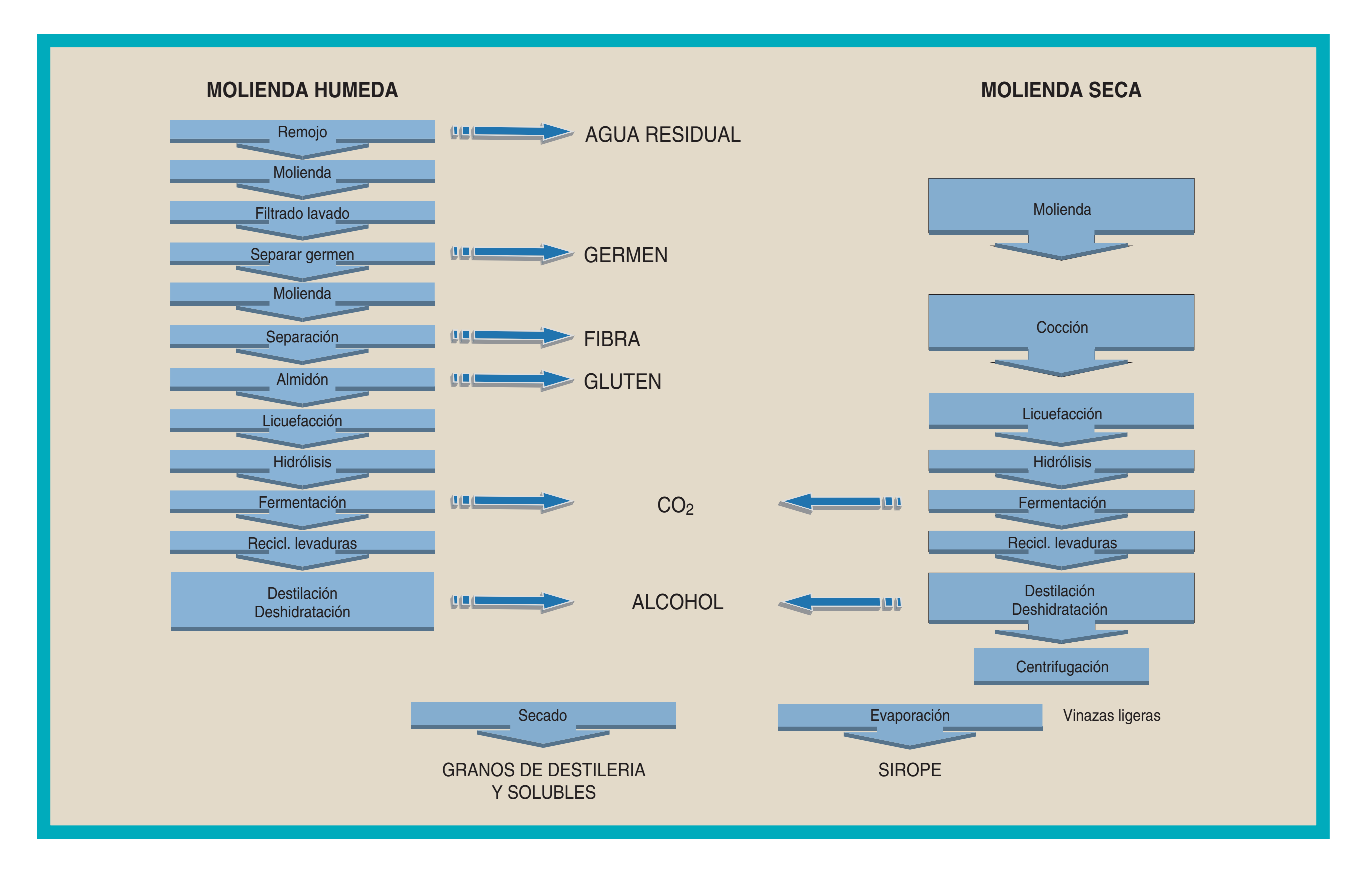
Se está iniciando la puesta en marcha de Biocarburantes de Castilla y León, en Babilafuente (Salamanca), con una capacidad de producción anual de 160.000 toneladas. Constituirá la primera instalación industrial que utilizará como materia prima para la producción de etanol, no sólo el grano de cereal (que supondrá el 95 % de la producción total), sino también la paja.

Materias primas del bioetanol

La caña de azúcar es el cultivo habitual para la extracción de etanol en los países de clima cálido; en Europa se emplea remolacha. Los cereales (maíz en Estados Unidos y trigo y cebada en Europa) son las materias primas para el etanol de almidón.

El precio de las materias primas viene regido por el mercado alimentario, su destino tradicional. Para las necesidades del mercado de la energía deben desarrollarse nuevos cultivos más productivos y rentables. Para liberarse de las fluctuaciones que suelen caracterizar los cultivos destinados a la alimentación (animal y humana), se están investigando otras especies, como la pataca (*Helianthus tuberosus* L.) y el sorgo azucarero (*Sorghum bicolor* L.). Estos cultivos, además de su menor coste de producción, serían más rentables para la obtención de etanol, ya que se podrían emplear los tallos secos (de la pataca) o el bagazo (del sorgo) para la generación del vapor y la electricidad necesarios en el proceso de fabricación de etanol.

Aparte de estos nuevos cultivos azucarados, los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un potencial mayor para la producción de bioetanol. Una gran parte de los materiales con alto contenido en celulosa, susceptibles de ser utilizados para estos fines, se generan como residuos en otros sectores. Así, los residuos agrícolas proceden de los cultivos leñosos y herbáceos. Los residuos de origen forestal proceden de los tratamientos silvícolas y de mejora y mantenimiento de los montes y masas forestales. También pueden utilizarse residuos generados en



4. ETAPAS DEL PROCESO de obtención de etanol a partir de materias primas amiláceas (con almidón), como los granos de cereal.

la industria papelera, y la fracción orgánica de los residuos sólidos industriales. Los materiales lignocelulósicos, aportados por cultivos dedicados a la producción de biomasa con fines energéticos pueden proceder de especies de crecimiento rápido y ciclos biológicos cortos (el eucalipto o el chopo) y de especies vegetales anuales.

Técnicas de producción de etanol

El bioetanol puede extraerse a partir de cualquier materia prima orgánica que contenga cantidades significativas de azúcares o compuestos que puedan transformarse en azúcares (almidón, inulina o celulosa). En la actualidad, el bioetanol se produce por la fermentación, mediante levaduras, de los azúcares (principalmente glucosa) contenidos en la materia prima. Las técnicas de transformación a partir de materias primas azucaradas o amiláceas han alcanzado un alto grado de refinamiento.

La manera más sencilla de producir etanol es utilizar materias primas que contengan azúcares de seis átomos de carbono (hexosas), como la caña de azúcar y la remolacha, ya que pueden ser fermentados directamente a etanol. El proceso general de fabricación de bioetanol combustible a partir de caña consta de varias etapas (*véase la figura 3*).

La caña preparada por las picadoras llega a los molinos y, mediante presión, se extrae el jugo, que se recolecta en tanques. En el recorrido de la caña por el molino se le agrega agua para insaturar los jugos y maximizar la extracción de la sacarosa, contenida en el material fibroso que pasa a través de todas las unidades que componen el molino. El jugo azucarado se precalienta, para facilitar su paso por el regulador de densidad y evitar al mismo tiempo la formación de microorganismos. Posteriormente se añade un ayudante de floculación con el fin de favorecer la formación de flóculos y así retirar, por precipitación, los sólidos suspendidos y algunas sustancias —sales de cal, material proteico— tóxicas para la fermentación y que agravan el problema de las incrustaciones en la destilación.

A continuación se realiza la fermentación. Por acción biológica de la levadura, los azúcares fermentables contenidos en el jugo se transforman en alcohol etílico y gas carbónico. El vino obtenido, con un 8 % de etanol en peso aproximadamente, se bombea hacia las destiladoras. El etanol y el vapor de agua dejan la parte superior de la columna con un 75 % en peso y entran en la rectificadora. Los líquidos y sólidos residuales, las vinazas, salen por el fondo de la columna y se bombean al sistema de tratamiento. En la rectificadora el alcohol se eleva a su punto azeotrópico de máxima concentración por simple destilación (el 96 %) y abandona la torre por la parte superior, convertido en vapor saturado, para entrar en la sección de deshidratación.

El bagazo que sale de la última unidad de molienda se emplea en las calderas para la producción del vapor utilizado en el proceso y, a la vez, de electricidad que atiende las necesidades de la planta; los excedentes se exportan a la red eléctrica y contribuyen a reducir los requerimientos de energía fósil y las emisiones de gases de efecto invernadero del proceso de producción de etanol a partir de caña de azúcar.

MERCEDES BALLESTEROS PERDICES



5. LA REDUCCION DE ALGUNAS EMISIONES CONTAMINANTES es una de las razones del interés por los biocarburantes. El uso de etanol y metanol como aditivo oxigenador de la gasolina limita la emisión de monóxido de carbono. El biodiésel ofrece ventajas ambientales con respecto al diésel ordinario; por esa razón algunas ciudades están probando autobuses de biodiésel; Madrid y Barcelona, entre ellas.

MERCEDES BALLESTEROS PERDICES

En los procesos ordinarios de obtención de etanol a partir de grano de cereal se emplean, para la fermentación, los azúcares del almidón, extraídos por un proceso de hidrólisis. Existen dos vías principales para la obtención de etanol a partir de grano de cereal; se diferencian, básicamente, en el proceso de molienda (*véase la figura 4*).

En la molienda húmeda, se empapa previamente el grano, lo que facilita la separación de sus componentes. El grano húmedo se procesa con una serie de amoladoras para separar el germen del maíz. El aceite de maíz del germen se extrae en la misma planta de producción de etanol o se vende a las trituradoras que extraen dicho aceite. Los componentes restantes de la fibra, del gluten y del almidón se van segregando. Tras un proceso de secado, se venden para alimentación animal. El almidón restante, mezclado luego con α-amilasas, se calienta a una temperatura entre 120 y 150 ºC para favorecer el proceso de licuefacción y evitar la proliferación de microorganismos no deseados. La mezcla se enfría y se le añade glucoamilasa, enzima que transforma el almidón licuefactado en dextrosa, un azúcar simple que pueden fermentar las levaduras. Después de la fermentación, el medio, que contiene aproximadamente un 10 % en volumen de etanol, se transfiere a las columnas de la destilación, donde se separa de los sólidos no fermentables y del agua. Este sólido, rico en proteína, se destina al mercado de la alimentación animal. El etanol, con un 96 % de pureza, sale por la parte superior de la columna y se transfiere al sistema de deshidratación, normalmente un tamiz molecular.

En los procesos de molienda seca no hay separación de los componentes que integran el grano. El cereal se tritura hasta obtener harina; se le añade agua, hasta formar un puré que se somete a un proceso de cocción y licuefacción, previos a la hidrólisis que convierte el almidón en dextrosa. A partir de aquí los procesos son los descritos anteriormente.

De las casi 70 plantas de producción de etanol a partir de cereal que están operando en Estados Unidos, el 55 % aplica la molienda seca y el 45 % la húmeda, mientras que en Europa todas las instalaciones recurren a la molienda seca, que tiene menor coste de capital asociado tanto a la construcción como a la operación.

Etanol lignocelulósico

Las técnicas actuales de producción de etanol a partir de cereal no ofrecen todavía soluciones competitivas desde el punto de vista de su coste. Su utilización sólo es viable si se reduce el tipo de impuesto especial aplicable al bioetanol. Por lo tanto, es necesario seguir mejorando los procesos de transformación, con mayores rendimientos y mejor calidad de los coproductos.

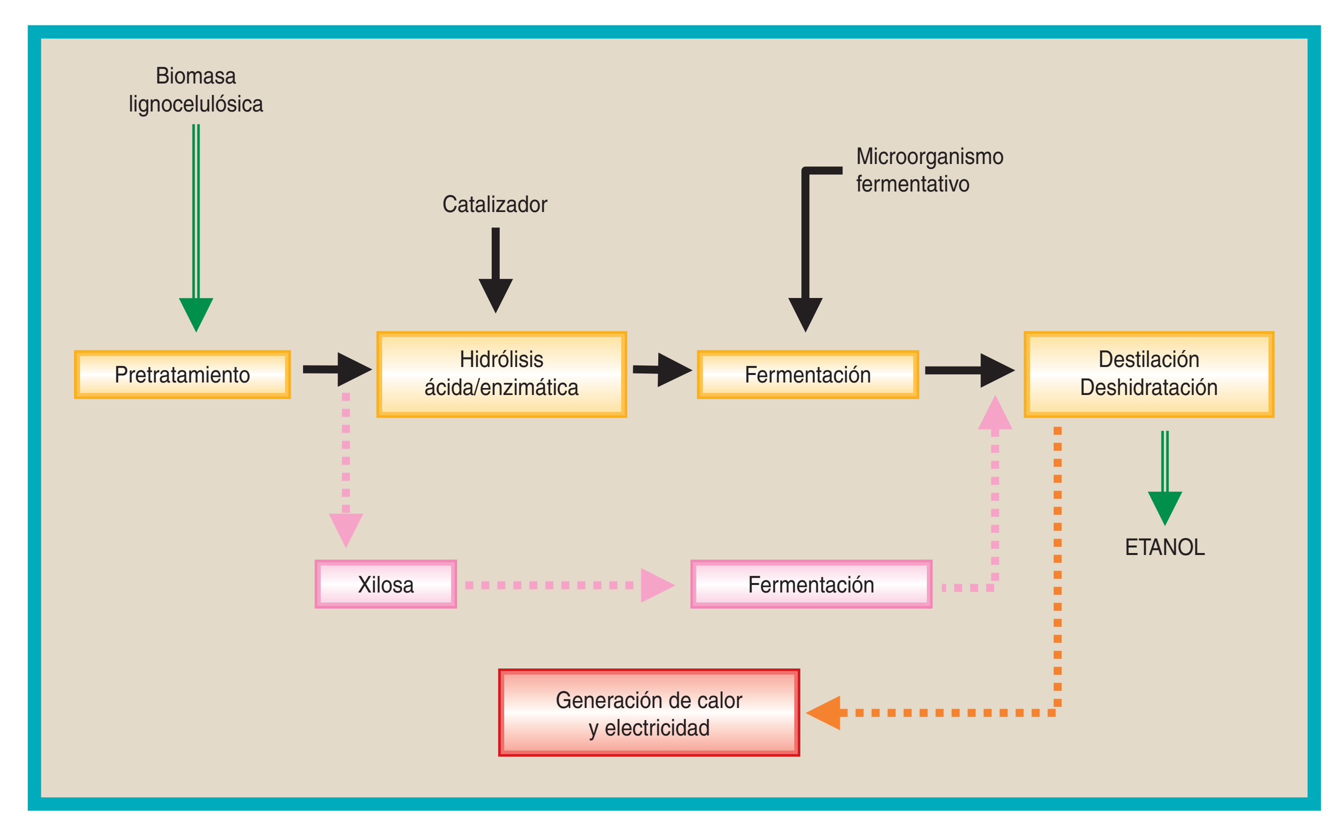
En este contexto, el desarrollo de los biocarburantes de segunda generación, fruto de la transformación de la biomasa lignocelulósica, en los que la investigación y el desarrollo desempeñan un papel importante, pueden contribuir de manera decisiva a mejorar la competitividad.

Los materiales lignocelulósicos están compuestos en su mayor parte por dos polímeros de carbohidratos, la celulosa (35-50 %) y la hemicelulosa (15-25 %), y un polímero fenólico, la lignina (20-25 %). La fracción mayoritaria de la biomasa lignocelulósica es la celulosa cristalina, constituida por cadenas largas de moléculas de D-glucosa unidas por enlaces β-(1-4) que, a su vez, se agrupan en estructuras superiores de gran cristalinidad, lo que dificulta su hidrólisis y conversión en azúcares fermentables. Sin embargo, una vez producidos, los azúcares simples se fermentan con facilidad.

La hemicelulosa está formada por polímeros de azúcares de cinco átomos de carbono (principalmente xilosa). Esta fracción se hidroliza con facilidad, pues no presenta estructura cristalina; sin embargo, la xilosa es un azúcar difícil de fermentar a etanol.

La lignina, por fin, es un polímero tridimensional de unidades de fenilpropano ligadas por enlaces éter y C-C.

Los carbohidratos presentes en la biomasa lignocelulósica pueden transformarse en etanol, tras un proceso de hidrólisis, mediante la acción de microorganismos fermentativos. Pero su estructura compleja hace que el proceso de transformación en etanol sea más difícil que en el caso del almidón. La hidrólisis de la celulosa puede llevarse a cabo con la intervención de catalizadores ácidos o enzimáticos (*véase la figura 6*). En los procesos de hidrólisis ácida, en condiciones adecuadas de presión y temperatura, se produce una solubilización de la hemicelulosa y



6. ESQUEMA GENERAL del proceso de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica.

la celulosa, quedando prácticamente inalterada la lignina. A temperaturas superiores a los 200 ºC aparecen productos de descomposición de los azúcares (furfural, hidroximetilfurfural y una serie de sustancias solubles no identificadas), lo que reduce el rendimiento del proceso. Tales sustancias inhiben el proceso fermentativo, por lo que deben eliminarse del hidrolizado antes de la fermentación.

Estos problemas que surgen cuando se somete la biomasa a un tratamiento ácido, se evitan si el proceso se acompaña de una hidrólisis enzimática. En este caso, hay que realizar un pretratamiento de la biomasa lignocelulósica que altere la compleja estructura de los materiales, facilitando así la acción de las enzimas celulolíticas. La dificultad estriba en que la cristalinidad de las moléculas de celulosa y la naturaleza de su asociación con la lignina constituyen una verdadera barrera física a la penetración de las enzimas. Existen otros factores, tales como el grado de polimerización y de sustitución de las cadenas celulósicas o el contenido en humedad y madurez de la fibra, que modifican también la capacidad de acción del complejo celulolítico sobre el sustrato lignocelulósico. Los pretratamientos hidrotérmicos y el empleo de ácidos diluidos constituyen los métodos más eficaces para mejorar la hidrólisis enzimática, ya que reducen la cristalinidad de la celulosa, aumentan la densidad de la biomasa y suponen bajos costes económicos y energéticos.

Una vez que el material ha sido pretratado se añaden las enzimas (celulasas), que rompen la celulosa en unidades de glucosa. Las celulasas realizan la fermentación de glucosa a etanol. Posteriormente, el etanol se concentra por destilación. Tras un proceso específico de deshidratación se obtiene el alcohol absoluto, el que se requiere si se desea utilizar el alcohol en mezclas con gasolina para vehículos.

Aunque todavía no existen plantas comerciales de etanol extraído de biomasa lignocelulósica, se han realizado avances significativos en investigación y desarrollo. La planta de Biocarburantes de Castilla y León es un buen ejemplo de ello. No obstante, se debe seguir avanzando para desarrollar sistemas más eficientes, tanto en lo que se refiere a la transformación biológica (nuevas enzimas y microorganismos capaces de fermentar todos los azúcares presentes en la biomasa lignocelulósica), como en el desarrollo de procesos innovadores de fraccionamiento y purificación, sin olvidar un mejor aprovechamiento de los coproductos generados.

Se puede también fabricar bioetanol a partir de la biomasa lignocelulósica mediante procesos termoquímicos en los que la biomasa se transforma en gas de síntesis (compuesto sobre todo por hidrógeno y monóxido de carbono). Se debe seguir avanzando en la investigación y desarrollo del proceso de gasificación con oxígeno como agente gasificante, en la limpieza y acondicionamiento del gas y en el desarrollo de catalizadores para la síntesis de etanol a partir del oxígeno.

Las técnicas avanzadas de producción de bioetanol también pueden constituir un punto de partida para el hidrógeno producido a partir de recursos renovables. Mediante procesos catalíticos cabe generar hidrógeno, por reformado del bioetanol con vapor, apto para alimentar una pila de combustible. Las pilas de hidrógeno permiten un transporte sin apenas emisiones, pero requieren motores de

MERCEDES BALLESTEROS PERDICES

nuevo cuño e importantes inversiones, en las instalaciones productoras de hidrógeno y en un nuevo sistema de distribución.

El transporte es un sector clave de nuestras economías. Los precios del petróleo se han triplicado en los últimos cuatro años. Los biocarburantes, los únicos productos renovables que pueden integrarse fácilmente en los actuales sistemas de distribución de combustibles, constituyen una de las pocas alternativas razonables de diversificación en el sector del transporte en el futuro inmediato. Además, pueden preparar el camino a una futura adopción del hidrógeno como combustible.

La autora

Mercedes Ballesteros Perdices es doctora en ciencias biológicas por la Universidad Autónoma de Madrid y máster en biotecnología por la Universidad Complutense de Madrid. Ha desarrollado su carrera investigadora en el departamento de energías renovables del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), donde actualmente es jefa de la Unidad de Biomasa.

Bibliografía complementaria

ESTRATEGIA DE LA UE PARA LOS BIOCARBURANTES. Comisión de las Comunidades Europeas COM (2006) 34 final. En: http://www.ec.europa.eu/agriculture/biomass/biofuel/com2006_34_es.pdf.

BIOFUELS IN THE EUROPEAN UNION: A VISION FOR 2030 AND BEYOND. FINAL DRAFT REPORT OF THE BIOFUELS RESERACH ADVISORY COUNCIL (2006). En: http// www.ec.europa.eu/research/energy/pdf/draft_vision_report_en.pdf.

BREAKING THE BIOLOGICAL BARRIERS TO CELLULOSIC ETHANOL: A JOINT RESEARCH AGENDA. DOE/SC-0095 (2006). En: http://www.doegenomestolife.org/biofuels/.

UNA ESTRATEGIA DE BIOCARBURANTES PARA ESPAÑA (2005-2010). Adaptación a los objetivos de la Directiva 2003/30/CE. Documento APPA 3¨05 (2005). En: http://www.appa.es/09documentos/documentos01.htm.

PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2005-2010 (PER).IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2005). http://www.mityc.es/Desarrollo/Seccion/EnergiaRenovable/Plan/.

Juan M.R. Parrondo

Los dados misteriosos y la razón áurea

— Los dados no engañan nunca, Simplicio. Una vez que salen de la mano, no obedecen voluntad alguna, salvo la de la fortuna. ¿No quieres probar si hoy te sonríe?

— Ya me has engañado muchas veces, Malaspina. Y aún ahora me vienes con unos dados endiablados, cada uno distinto del otro y con números que no había visto jamás. El primero tiene en sus seis caras los números 1-1-5-5-5-5, el segundo 3-3-3-4-4-4 y el tercero 2-2-2-2-6-6. ¿Cómo quieres que me atreva a jugar contigo si seguramente habrás compuesto estos dados para dejarme sin blanca?

— Yo te aseguro que ninguno de ellos es mejor que el otro, descreído. Y para demostrártelo, te dejaré elegir primero. Tú jugarás con el dado que desees y yo con alguno de los dos que rechaces. Cada uno tirará su dado y el que tenga la jugada menor pagará un escudo al otro.

— Esta parece una ventaja considerable. Déjame ver... elijo el tercero de los dados, que al menos tiene un par de seises.

— Sabia elección, Simplicio. Yo me quedaré con el segundo, por quedarme con alguno...

Después de cien tiradas, Simplicio había perdido más de 20 escudos y comenzaba a arrepentirse de su elección:

— De poco valen mis dos seises, si todos tus números ganan a mis cuatro doses. Me parece que me has vuelto a engañar. ¡No quiero seguir jugando!

— Toma entonces mi dado, Simplicio, y yo tomaré el que nadie quiso en un principio: el primero.

— Con este trueque sí probaré fortuna.

Pero en cien nuevas tiradas, Simplicio volvía a perder otros 20 escudos:

— ¡Sí que es mala mi suerte! Dame ahora ese dado con el que juegas, que parece ser el mejor de todos.

— Tómalo, Simplicio. Yo me quedaré con el tercero, el que tan mala suerte te dio en las primeras cien jugadas.

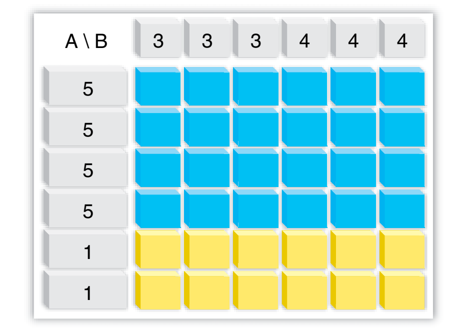
Y, de nuevo, Malaspina logró vaciar los bolsillos de Simplicio, ganándole esta vez 10 escudos en otras cien jugadas.

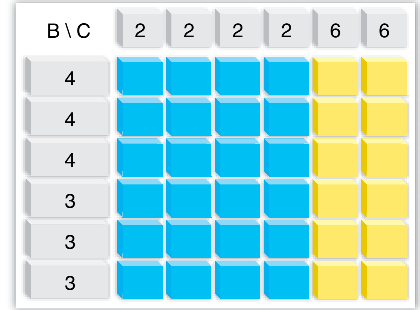
— No importa el dado con el que juegue —se lamentaba el perdedor—, la suerte no está hoy de mi lado. Me da en la nariz que alguna trampa has escondido entre todos estos números, pero no acierto a descubrirla.

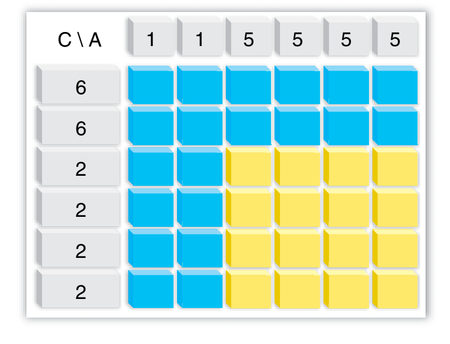
En efecto, los dados de Malaspina tienen una propiedad desconcertante, capaz de confundir a un jugador ingenuo. Ninguno de ellos es el mejor, el primero gana al segundo con bastante probabilidad, el segundo al tercero y el tercero al primero. Calcular estas probabilidades no es complicado. En la figura 1 muestro tres tablas, correspondientes a los tres posibles enfrentamientos entre los dados. He sombreado en color azul las casillas en las que el dado del eje vertical gana al del eje horizontal.

Contando las casillas azules y dividiendo por el número total de casillas, que es 36, obtenemos cada probabilidad. La de que el primer dado (A) gane al segundo (B), será 24/36 = 2/3 = 0,6666..., la de que B gane a C también 24/36, y la de que C gane a A es 20/36 = 5/9 = 0,5555... Las tres son mayores que 1/2 y es por ello por lo que Malaspina siempre gana, al cabo de un gran número de jugadas, al pobre Simplicio. Estamos ante una nueva paradoja de intransitividad, similar a algunas de las que ya hemos discutido en esta sección (*Paradojas democráticas*, marzo de 2002, y *Quien ríe el último...,* noviembre de 2005).

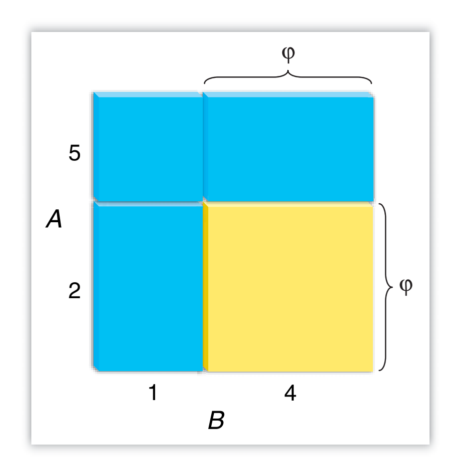
En esta ocasión, nuestros dados son un caso particular de la llamada *paradoja de Steinhaus-Trybula*, dos matemáticos que analizaron por primera vez la posibilidad de que, dadas tres cantidades aleatorias *A*, *B* y *C*, aconteciera

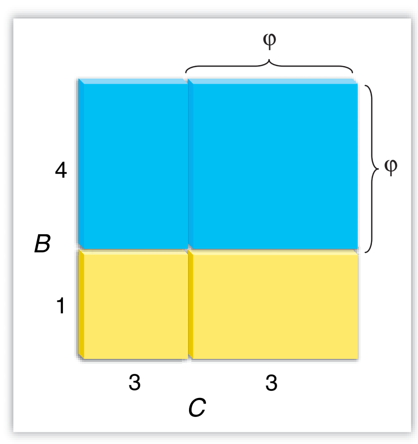


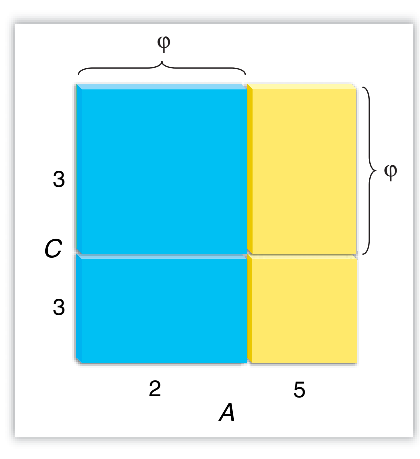




1. Diagramas para el cálculo de probabilidades de ganar con los dados misteriosos, A, B y C. Las casillas azules muestran las situaciones en las que el dado del eje vertical gana al del eje horizontal.







2. Probabilidades en los enfrentamientos de tres "dados" A, B, y C. En cada enfrentamiento, el área de la región azul indica la probabilidad de que el dado vertical gane al horizontal. Las tres probabilidades de ganar son iguales a la razón áurea φ. El lado del cuadrado completo es 1 en los tres casos.

que las tres probabilidades $P(A>B)$, $P(B>C)$ y $P(C>A)$ fueran mayores que 1/2. La paradoja puede dar lugar a situaciones sorprendentes no sólo en el juego. Por ejemplo, si las cantidades *A*, *B* y *C* fuesen los tiempos de llegada de tres autobuses a una parada, sería más probable que llegase A antes que B, también sería mayor la probabilidad de que B llegue antes que C y, finalmente, ¡lo más probable sería que C llegase antes que B! Aunque pueda parecer absurdo, el cálculo de probabilidades muestra que esta situación es perfectamente posible.

Trybula demostró más tarde un teorema bastante curioso en el que, inesperadamente, aparece una vieja amiga de la que también hemos hablado aquí: la razón áurea, $\varphi = (\sqrt{5} - 1)/2$ = 0,618... (*El número de oro*, enero de 2003). El teorema afirma que, siempre que se dé la paradoja de intransitividad, al menos una de las tres probabilidades $P(A>B)$, $P(B>C)$ o $P(C>A)$ tiene que ser menor o igual que φ.

No podemos hacer aquí una demostración rigurosa del teorema, pero sí esbozarla para ver cómo puede aparecer en este contexto la razón áurea. Para ello, supongamos que cada una de las cantidades aleatorias, *A*, *B* y *C*, sólo puede tomar dos valores de entre los números 1, 2, 3, 4 y 5. Una forma de asignar probabilidades a esos valores viene dada por la siguiente tabla:

Valor	1	2	3	4	5
Probabilidad	$1-p_B$	$1-p_A$	1	p_B	p_A
Cantidad aleatoria	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*

Por ejemplo, la cantidad *A* sólo puede tomar los valores 2 y 5 y lo hace con probabilidades, $1-p_A$ y p_A, respectivamente. Este reparto de los posibles valores entre las tres cantidades aleatorias es bastante igualitario, puesto que se van repartiendo los cinco valores de mayor a menor, como en la elección del equipo de fútbol en el patio de un colegio. Uno de los pasos cruciales y más ingeniosos de la prueba del teorema de Trybula es precisamente demostrar que este reparto es el que maximiza las probabilidades de que una cantidad sea mayor que otra, manteniendo la paradoja. A partir de esta tabla pueden encontrarse las tres probabilidades de ganar en cada enfrentamiento:

$$P(A>B) = p_A + (1-p_A)(1-p_B)$$
$$P(B>C) = p_B$$
$$P(C>A) = 1-p_A$$

Otro paso sutil de la demostración consiste en probar que, en el reparto que maximiza las probabilidades (más precisamente: el reparto que maximiza la más pequeña de las tres probabilidades), éstas tienen que ser iguales. La razón es que, si no lo fueran, siempre podríamos aumentar alguna de ellas ligeramente, variando alguno de los dos parámetros p_A o p_B. Una vez que se llega a esta conclusión, lo que queda es un poco de álgebra: se igualan las tres probabilidades y, de las dos ecuaciones resultantes, se obtienen p_A y p_B, que resultan ser: $p_A = 1-\varphi$ y $p_B = \varphi$. Finalmente, se calculan las probabilidades con esta solución y obtenemos que las tres valen precisamente φ.

Trybula diseñó además un ejemplo en el que este áureo valor máximo se puede alcanzar. De hecho, la propia demostración que hemos esbozado aquí conduce inmediatamente al ejemplo. En la figura 2 se ve gráficamente el cálculo de probabilidades. Como en las tablas de la figura 1, las áreas azules indican la probabilidad de que la cantidad aleatoria del eje vertical gane a la del eje horizontal. Las tres áreas valen exactamente φ, gracias a una de las propiedades matemáticas del número de oro: $\varphi = 1-\varphi^2$.

Les dejo con otros dados paradójicos, tan curiosos o más que los anteriores. En el A las caras contienen los números 1-5-5-5-5-7, en el B, 2-4-4-6-6-6, y en el C, 3-3-3-3-8-8. En este caso, A gana a C y B también gana a C. Pues bien, a pesar de que, en apariencia, C es el peor de los tres dados, si jugamos con todos ellos a la vez, es decir, tirando los tres y otorgando la victoria al de mayor puntuación, ¡el que tiene la probabilidad más alta de ganar es C! Si trasladamos la paradoja a la llegada de los autobuses, significaría que lo más probable es que A llegue antes que C, que B llegue antes que C, pero el que tiene más probabilidades de llegar primero de los tres es C. El cálculo de las probabilidades es bastante sencillo, aunque el resultado parezca increíble. Todas estas paradojas tienen además un interés no sólo recreativo o académico, ya que ponen en jaque la suposición básica de la teoría de la utilidad: que somos capaces de ordenar nuestras preferencias de modo lineal.

Mark Fischetti

TORRES DE AGUAS

Una tarea de altura

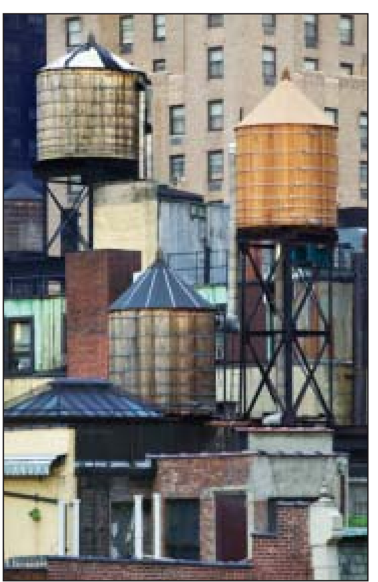
Al pasear junto a una torre de aguas, nos parece un gigante silencioso y pasivo. Sin embargo, constituye el principal de los participantes en un juego de equilibrio entre altas presiones.

En su mayoría, los municipios consiguen el agua de embalses o de pozos, la purifican en una planta de tratamiento y la envían a una sala de bombas desde la que se llenan uno o más depósitos elevados. Las bombas solas ya tienen potencia suficiente para impulsar el agua por una red urbana de tuberías, pero la presión del sistema —la que hay en la pila o en el lavabo de casa— fluctúa según sube o baja la demanda; podría caer tanto que no llegara a los grifos durante los picos de consumo. La torre de aguas opera como un condensador. Mantiene una presión constante en las líneas y proporciona un abastecimiento de refuerzo cuando la demanda excede el caudal que pueden dar las bombas.

Los depósitos se dimensionan para almacenar el consumo de un día más reservas. Las bombas pueden funcionar sin parar; llenan el depósito por la noche, cuando la demanda es baja. Cuando la mayoría de la población se ducha por la mañana, los depósitos complementan el caudal que suministran las bombas.

Las torres de aguas destacan en tierra llana, pero depósitos de agua hay en todas partes. Descansan directamente —a veces ocultos— sobre un terreno elevado en lugares accidentados y encaramados a las azoteas en las ciudades. Los depósitos de torre o de terreno alto suelen encontrarse a unos 30 metros por encima de los usuarios más elevados. Cada diez de esos metros crean una presión de una atmósfera (alrededor de un kilo de fuerza por centímetro cuadrado); o sea, 3 atmósferas para los treinta metros. En una tubería urbana situada en un valle de mayor profundidad, la presión alcanzaría valores superiores; en las ciudades se instalan válvulas manorreductoras en las líneas donde la presión sube a 5,5 atmósferas o más, lo que dañaría los retenes y las válvulas de las fontanerías domésticas.

El rozamiento del agua en el interior de las tuberías afecta también al equilibrio: reduce entre 0,20 y 0,35 atmósferas la presión del sistema. El rozamiento crece con el cuadrado de la velocidad, por lo que el agua que, durante los picos de demanda, fluye a velocidad doble que cuando la demanda es baja multiplica por cuatro las pérdidas por rozamiento. Los conductos viejos, sobre todo si tienen muchos sedimentos e incrustaciones, causan verdaderos problemas de rozamiento.



DANIELS & DANIELS (*ilustraciones*); CHRIS HELLIER *Corbis* (*castillo*); CORBIS (*de tejado*); KEVIN SCHAFER *Corbis* (*rayados*); DOUGLAS PEEBLES *Corbis* (*piña*)

1. LAS FORMAS ENGAÑAN. Los depósitos suelen construirse en forma cilíndrica; así se distribuye por igual el peso del agua sobre las columnas de soporte. Luego se añaden fachadas por razones de estética. En sentido horario desde arriba a la izquierda: Forcalquier (Francia), la ciudad de Nueva York, Kuwait y Honolulu (Hawai).

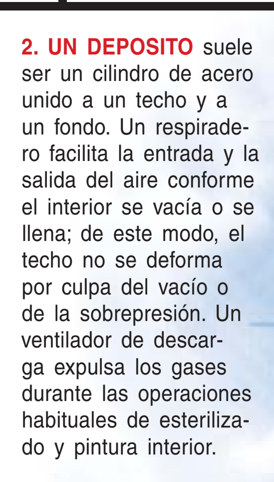
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **CARGAS PESADAS:** Un depósito normal puede guardar hasta cuatro millones de litros de agua, con un peso de 4000 toneladas. Para soportar esa carga, se requieren unos fuertes apoyos de hormigón, así como las debidas a vientos transversales de hasta más de 150 kilómetros por hora que actúan sobre el depósito en una tormenta. En los enclaves idóneos la tierra debe ser, por tanto, de densidad elevada, si no rocosa. En las llanuras donde el terreno corresponde en gran parte a depósitos glaciales no estratificados (till), como Dakota del Norte, los pilotes de acero que sujetan los apoyos se hincarán hasta 30 metros de profundidad.

➤ **ESTERILIZACION:** Los depósitos se vacían anualmente; se desinfectan con cloro y amoniaco pulverizado. Puede que al tapón de purga se añada dióxido de azufre al objeto de neutralizar la amenaza ecológica que supone el cloro. La mayoría de las ciudades, sea cual sea su tamaño, cuentan con más de un depósito; se aseguran así un abastecimiento holgado de presión, que facilita la rotación de mantenimiento.

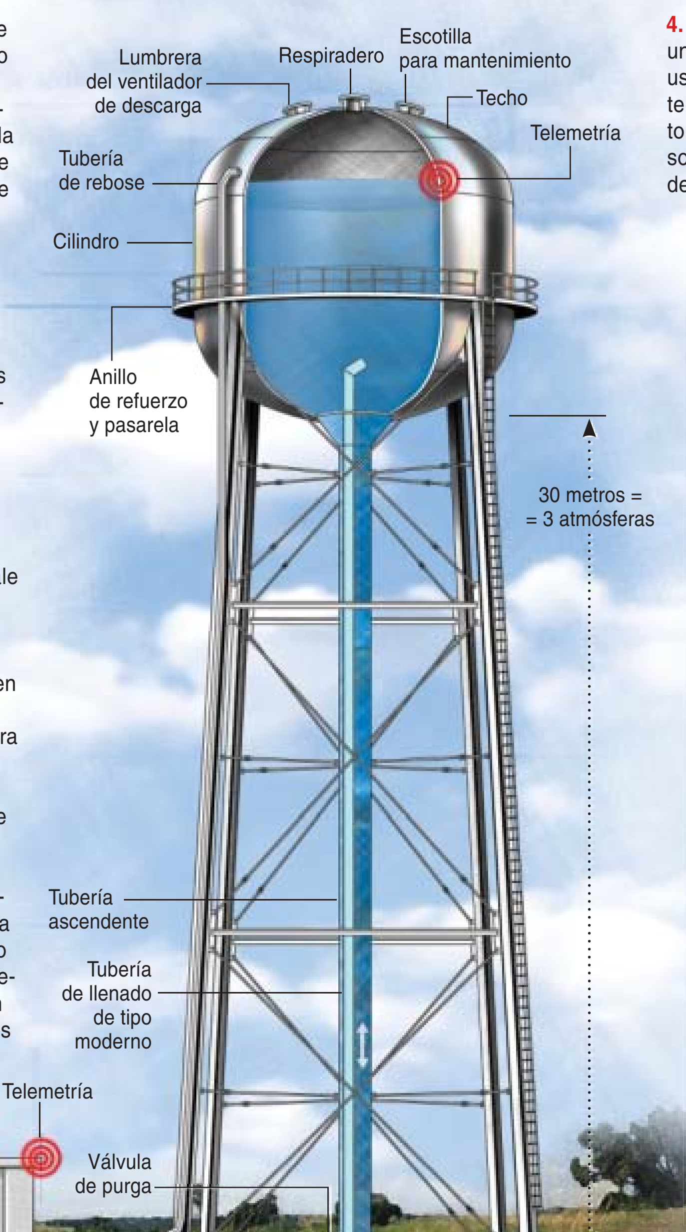
➤ **NO ES POR LA PRESION:** Los bomberos que en primavera abren las bocas de incendios no lo hacen para aliviar el exceso de presión. Comprueban si las válvulas de las bocas funcionan y limpian las líneas de las acumulaciones de sedimentos que pudieren reducir la presión en ellas.

➤ **TELEFONIA CELULAR:** Numerosos municipios están alquilando espacios en los techos de los depósitos a proveedores de telecomunicaciones, ya que los transceptores de telefonía celular dan su mejor prestación cuando se hallan a 30 o 50 metros por encima de los comunicantes, que es la altura habitual de las torres de aguas.

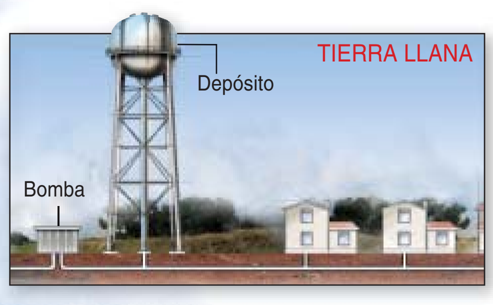


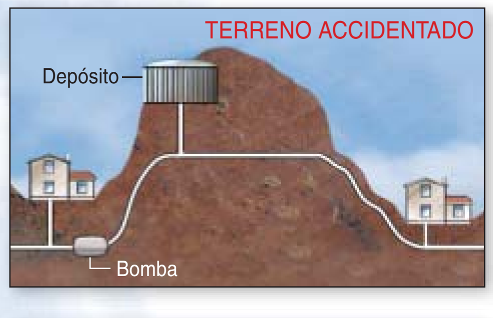
2. UN DEPOSITO suele ser un cilindro de acero unido a un techo y a un fondo. Un respiradero facilita la entrada y la salida del aire conforme el interior se vacía o se llena; de este modo, el techo no se deforma por culpa del vacío o de la sobrepresión. Un ventilador de descarga expulsa los gases durante las operaciones habituales de esterilizado y pintura interior.

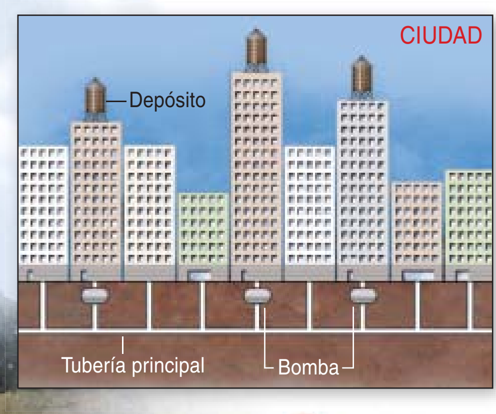
3. LA BOMBA impulsa el agua por la tubería ascendente; el agua sale a través de la misma derivación hacia las tuberías urbanas. Los modelos nuevos incluyen una tubería de llenado más alta y sesgada para que los contenidos se mezclen mejor, lo que reduce la posibilidad de que se estanque agua dentro del depósito. Unos monitores telemétricos controlan la altura del agua en el depósito y la presión en las tuberías; también gobiernan los arranques y paradas de las bombas.



4. EL EMPLAZAMIENTO lo determina la topografía: un depósito urbano debe estar a mayor altura que el usuario más elevado para que la presión sea suficiente. En tierra llana, la elevación se consigue con una torre. En zonas accidentadas, el depósito descansa sobre terreno elevado. En las ciudades, los depósitos de azotea refuerzan las bombas de sótano.







Marc Boada

Obtención del fuego

Con el dominio del fuego se inicia, en la mitología griega, la independencia del hombre, el origen de las artes y las ciencias. Más allá de esta o de cualquier otra visión antropológica, el fuego es la manifestación luminosa y calórica asociada a la combustión o, con mayor precisión, a una oxidación tan exotérmica, que se retroalimenta.

El registro arqueológico aporta pruebas del uso del fuego en la remota prehistoria. Aunque se han encontrado hogares datados en más de 400.000 años, las primeras pruebas de obtención intencionada aparecen hace unos 20.000 años. En excavaciones del Paleolítico superior se han encontrado testimonios de encendedores: constan de un fragmento de algún sulfuro de hierro natural, como la pirita (”pyros”, fuego en griego), asociado a un fragmento de sílex. En un comienzo, el fuego facilitaba la alimentación, el abrigo y la protección. Más tarde permitió transformar la materia para obtener nuevos recursos artificiales.

Dedicaremos esta colaboración a ensayar una técnica muy antigua: arrancar chispas de la superficie de un fragmento de pirita mediante el raspado con una piedra. Este método ha evolucionado en paralelo a la ciencia de materiales. De la pirita se pasó al eslabón de acero de las culturas ibéricas, que perduró hasta hace poco más de un siglo, cuando se sustituyó por los primeros encendedores de mecha de algodón y “piedra” en aleación pirofórica.

Las piedras pirofóricas y los sulfuros de hierro producen chispas por fricción. Las piedras constan de pequeñas partículas que, al ser arrancadas, adquieren una temperatura suficiente para sufrir una oxidación veloz cuando entran en contacto con el oxígeno del aire. En la oxidación se alcanzan temperaturas de entre 760 y 870 grados centígrados; se generan anhídrido sulfuroso y óxido férrico, responsables de un olor azufrado y metálico característicos.



1. Formación de la brasa en el hongo yesquero. Después se introduce ésta entre vegetales fibrosos.

TONI PALOMO (*arriba*)

Las partículas en ignición iniciarán el fuego en sustancias inflamables.

Empezaremos por procurarnos un trozo de pedernal o sílex, óptimos por su dureza. Se trata de dióxidos de silicio. A diferencia del cuarzo, son criptocristalinos o amorfos. Su estructura atómica desordenada les confiere un alto grado de isotropía, que se manifiesta a escala macroscópica en fracturas concoideas. Este tipo de fractura permite obtener, por percusión, la diversidad de formas que encontramos en el utillaje lítico de la prehistoria.

El pedernal se da en terrenos antiguos de toda la península, en filones que atraviesan rocas metamórficas.



2. Fragmentos de sílex.

Presenta una fractura irregular. Cuando contiene pocas impurezas, es de color blanco. Si golpeamos dos trozos de pedernal a oscuras observaremos unos débiles chispazos, acompañados de un olor característico. Pese a la espectacularidad del fenómeno, no es éste el tipo de encendedor que nos interesa; no produce fuego. El chispazo generado se circunscribe al punto de impacto y se debe a un proceso piezoeléctrico en el que la energía del impacto deforma el retículo atómico, provocando la emisión de algunos fotones (liberación de energía). Las chispas de nuestro experimento, en cambio, se producirán merced a la energía química o "de enlace" entre la pirita y el oxígeno atmosférico.

Además del pedernal, podemos utilizar un rascador de sílex. Menos abundante, se halla en terrenos sedimentarios, en ocasiones asociado a yesos y arcillas. Suele aparecer en forma de nódulos. Se presta a la talla por percusión, lo que constituye una ventaja nada despreciable.

Utilizando uno u otro material, generaremos un cuerpo plano. En su perímetro tallaremos, mediante un martillo y golpes cuidadosos, una arista no muy afilada.

El sílex y la pirita se adquieren en tiendas de mineralogía en forma de piezas de 40 o 50 milímetros. La pirita, FeS_2, constituye el sulfuro más extendido en la superficie del planeta. Suele formar cristales o masas cristalinas de sistema cúbico, octaédrico o dodecaédrico, de color amarillo latón y reflejos verdosos; presenta una densidad elevada, que comparte con otros sulfuros de hierro, como la pirrotina, $Fe_{(1-X)}S$ ($x < 1$), o pirita magnética, y la marcasita, FeS_2. Pese a que esta última desarrolla cristales ortorrómbicos, suele presentar una estructura fibrosa radial y hábito típicamente nodular. Todos ellos pueden resultar útiles, pero es la marcasita el mineral que ofrece mejores resultados, merced a su inestabilidad.

El almacenamiento de la marcasita debe realizarse en ausencia de humedad, para evitar que se descomponga y genere trazas de ácido sulfúrico que corroen cuanto le rodea. Se trata del mineral más pirofórico de la serie, es decir, el que más chispas produce.

Por fin, para completar nuestro encendedor primitivo debemos aprovisionarnos de los combustibles propiamente dichos: yesca (el iniciador) y vegetales fibrosos. Compete a la yesca recibir las chispas obtenidas de la pirita e iniciar una pequeña brasa. Como iniciador pueden utilizarse diversos materiales, siempre porosos y muy inflamables: la "pelusa" que produce la espadaña (*Typha latifolia*) al florecer, semillas filamentosas e incluso pelo o plumas.

En nuestras latitudes, la mejor opción nos la proporciona el hongo yesquero (*Fomes fometarius*); en concreto, su carpóforo o cuerpo reproductor. Medra en la superficie de troncos de haya (*Fagus sylvatica*) o castaño (*Castanea sativa*), y en lugares húmedos y poco soleados. Forma ménsulas, en ocasiones de gran tamaño (de 200 o 300 milímetros); crece durante varios años. Presenta estructuras exteriores concéntricas. En su madurez, muestra un color oscuro; adopta entonces una consistencia suberosa y dura. En sección se observan las capas de tubos y tejido que crea año tras año.

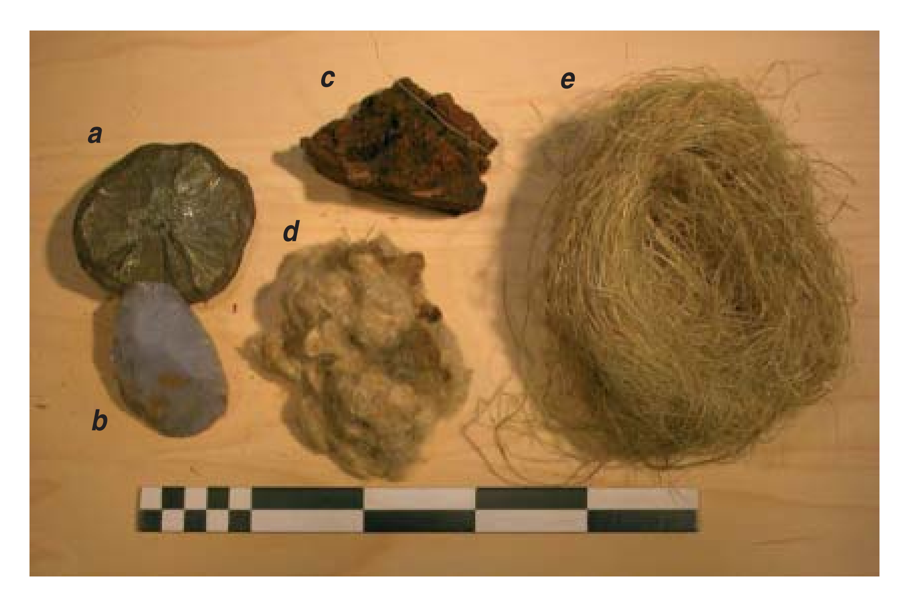
Este tejido, situado bajo la corteza superior, se aprovecha para la preparación de la yesca. Con una navaja eliminaremos del tejido corteza y tubos; lo sumergiremos en agua hasta que quede saturado; lo golpearemos con un mazo para reblandecerlo. Tras un buen secado, mostrará un típico color canela y aspecto aterciopelado. Cuando la yesca es de buena calidad



3. Materiales pirofóricos: marcasita (*a*), pirita (*b*) y pirrotina (*c*).



4. Combustibles: paja (*a*), musgo (*b*) y fibras vegetales (*c*)



5. Kit para la obtención de fuego: marcasita nodular (*a*), raspador de sílex (*b*), yesca (*c*), semillas de espadaña (*d*) y fibras vegetales (*e*).

y está perfectamente deshidratada, arde con facilidad: a unos 250 ºC se inflama de una manera espontánea. Para deshidratarla se coloca varias horas en una estufa a 150 ºC; se guarda luego en un frasco hermético con un desecante. Se obtienen resultados mejores si la yesca se sumerge, una vez seca, en una disolución concentrada de nitrato potásico (KNO_3), sustancia comburente (antaño denominada nitro o salitre), y se deja secar de nuevo.

Para experimentadores inquietos, existe otro método de obtención de yesca altamente combustible. Consiste en impregnar ésta en una campana de vacío, de suerte que la disolución de nitrato potásico penetre hasta el núcleo. (Cuando se agita esta sal potásica para disolverla, observamos que la temperatura del agua desciende. Un excelente ejemplo de disolución endotérmica.)

Tomaremos también hierba seca, paja, agujas de pino o, mejor todavía, corteza de álamo (*Populus nigra*). Frotaremos ésta entre las manos para reducirla a delgadas fibras finas, que luego moldearemos hasta que adquieran una figura cóncava de unos 150 milímetros. Con todo a punto, acometeremos la experimentación.

Tomemos en una mano la pirita. Coloquemos bajo la misma un trozo de iniciador perfectamente seco. Con la otra mano sostendremos el rascador de sílex. Describiendo un arco, rasquemos repetidamente sobre la pirita con la arista del pedernal. No se trata de golpear, sino de raspar la superficie para proyectar chispas sobre el hongo yesquero. Observaremos —mejor a oscuras— que van cayendo sobre la yesca y arden durante unos instantes. Soplemos con suavidad; quizás en alguna aparecerá una brasa incipiente. Dejaremos crecer la brasa hasta que alcance 6 u 8 milímetros; con una navaja o el propio pedernal la arrancaremos. La colocaremos en el cuenco de fibras vegetales, que previamente hemos preparado. Cerraremos éste; soplaremos, suavemente al principio, mientras va surgiendo un humo espeso. Podemos entonces aportar más oxígeno o hacerlo voltear con el brazo. En ocasiones resulta necesario alimentar la brasa arrancada a la yesca con algunas fibras menudas o agujas de pino. Al fin, y en pocos segundos, una gran llama se propagará por todo el vegetal, que será ya capaz de encender un buen fuego.

El proceso debe avanzar paso a paso. Nuestra energía muscular aporta, mediante fricción, la energía de activación para que aparezca una chispa; de ésta pasamos a una brasa, luego a una llamita y, por fin, a un fuego autosostenido.

Las analogías técnicas entre un encendedor moderno y el paleolítico que hemos descrito son numerosas; las diferencias corresponden más a los compuestos que a los procesos. Hoy la pirita se ha sustituido por una aleación pirofórica de cerio con algo de hierro y trazas de otros metales; la yesca, por gas natural. El encendedor moderno es más eficaz porque almacena más energía; desde el punto de vista termodinámico, es más inestable.



6. Obtención, por fin, de la llama.

Revoluciones científicas

Los otros protagonistas

ROBERT HOOKE. TERCENTENNIAL STUDIES. Dirigido por Michael Cooper y Michael Hunter. Ashgate; Aldershot, 2006.

THE LIFE OF ALFRED RUSSEL WALLACE. THE HERETIC IN DARWIN'S COURT, por Ross A. Slotten. Columbia University Press; Nueva York, 2004. THE ALFRED RUSSEL WALLACE READER. A SELECTION FROM THE FIELD. Edición preparada por Jane R. Mamerini. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 2002.

IL NOBEL DIMENTICATO. LA VITA E LA SCIENZA DI CAMILLO GOLGI, por Paolo Mazzarello. Bollati Boringhieri; Turín, 2006.

Tres grandes revoluciones de la ciencia van asociadas a otros tantos personajes indiscutibles: las leyes de la mecánica con Isaac Newton, la selección natural como mecanismo de evolución de las especies con Charles Darwin y la teoría de la neurona con Santiago Ramón y Cajal. La historiografía reciente, según evidencian los libros de cabecera, revela que su fama debiera ser, con justeza, compartida.

Desde el trabajo de W. W. Rouse Ball, en las postrimerías del siglo XIX, ningún historiador de la física pone en cuestión la deuda contraída por Newton con Robert Hooke (1635-1703). Michael Naenburg pormenoriza ahora el rosario de ideas de los *Principia* cuya paternidad debe reconocerse al habilidoso experimentador de la Regia Sociedad (*Robert Hooke. Tercentennial Studies*). Incluida la noción nuclear en que Newton apoyó su síntesis, a saber, la combinación de velocidad radial y velocidad tangencial para explicar el movimiento elíptico de los planetas.

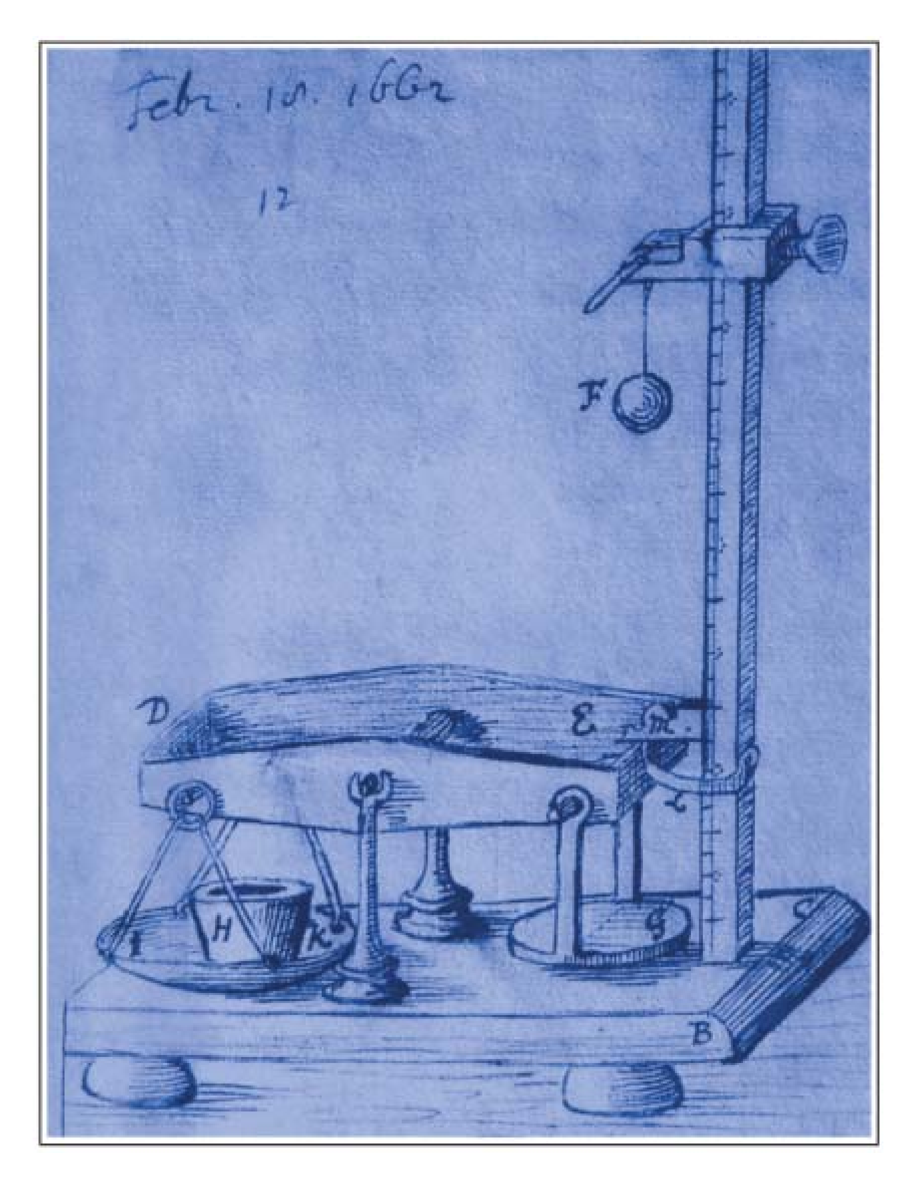
Hooke había nacido en Freshwater, en la isla de Wight. Desde muy joven dio muestras de su extraordinaria habilidad. Montó relojes de sol y de madera; construyó ingeniosos juguetes mecánicos. Luego de estudiar lenguas clásicas y matemáticas, se matriculó en Oxford en 1655, comenzando a frecuentar el círculo de los que estaban creando la nueva filosofía mecanicista. Contratado por Robert Boyle, se convirtió en su mano derecha experimental. En 1662 la Regia Sociedad le nombró encargado de los experimentos, con la tarea asignada de realizar tres o cuatro demostraciones en sus reuniones semanales. Un compromiso que espoleó su capacidad de invención.

En los dibujos relativos a sus observaciones microscópicas para la Sociedad basó buena parte de su *Micrographia* (1665). Allí se encuentran sus especulaciones sobre la luz, considerada por Hooke una vibración rápida de amplitud pequeña. Describió la difracción, así como los fenómenos de interferencia entre dos lentes, conocidos más tarde por "anillos de Newton", e introdujo la idea de frente de ondas. La visión que Hooke tenía de la naturaleza se alejaba de las dos doctrinas dominantes en su tiempo, la mecanicista y la mágica. Sus saberes se extendían de la cosmología a la geología, pasando por la meteorología (organizó observaciones del tiempo en cooperación y proyectó un termómetro).

El sistema geológico de Hooke sobre la Tierra, según queda expresado en sus *Discourses of Earthquakes*, publicados póstumamente en 1705, incorpora algunos conceptos fundamentales que se apartan de las opiniones dominantes en su tiempo. Se interesó por el pasado del planeta y el origen orgánico de los fósiles. Fue impartiendo los discursos sobre los "terremotos" a lo largo de más de 30 años, desde 1664 hasta 1699. Por "terremoto" no designaba sólo episodios violentos, movimientos sísmicos catastróficos o episodios de vulcanismo, sino que abarcaba también otras fuerzas diastróficas que modificaban los accidentes del relieve: carácter cíclico de los procesos de sedimentación, consolidación, levantamiento, erosión y denudación, procesos de putrefacción, erupciones y terremotos subterráneos. Hooke se percató de la ley de la superposición", que reconoce que la capa inferior de una secuencia de estratos es, a su vez, la más antigua. Para sus teorizaciones se inspiró en la observación de los acantilados de la isla de Wight. Al abordar la evolución biológica reflejada en los fósiles negaba que éstos fueran restos diluvianos. Los vinculó al concepto de extinción. Hubo antaño, proponía, otros tipos de seres de los que no queda ningún ejemplar y podría haber ahora nuevas especies que no aparecieron en un comienzo.

Dotado de particular ingenio en la proyección de instrumentos y máquinas, realizó sólidas aportaciones a la arquitectura, plasmadas en la reconstrucción de Londres en su calidad de Inspector de la Ciudad, tras el gran incendio de 1666. Fueron proyectos suyos el Colegio Real de Médicos y el Hospital Bedlam, entre otros, cuyo nivel resiste la comparación con los proyectados por Christopher Wren.

En numerosas ocasiones, sus hallazgos se vieron rodeados por la polémica. Ocurrió con el resorte espiral, invención que se arrogó Christiaan Huygens. Pero quizá lo que más le dolió a Hooke, por lo que se sintió traicionado, fue el comportamiento de Newton. Durante la segunda mitad del siglo XVII, la astronomía pugnaba por hallar una explicación de las bases físicas de las tres leyes empíricas de Kepler sobre el movimiento orbital de un planeta en torno al Sol. En el ecuador de los sesenta de esa centuria, Hooke propuso que los



Dibujo de Hooke que ilustra el aparato por él creado para medir la "fuerza de caída de los graves desde distinta altura".

movimientos orbitales de los planetas eran combinación de un movimiento rectilíneo a lo largo de la tangente y de un movimiento gravitatorio centrípeto. Y así se lo comunicó a Newton en 1679, quien poco después esbozaba una construcción geométrica a partir de la cual dedujo el origen físico de la ley de Kepler sobre las áreas, que andando el tiempo se convertiría en la proposición I, libro I, de sus *Principia*, aparecidos en 1687. Pero tres años antes Newton había depositado un borrador preliminar, su *De motu corporum in gyrum*, en la Regia Sociedad de Londres. Hoy no cabe duda de que Newton destruyó las pruebas que pudieran mostrar la aportación de Hooke y creó falsas pistas para establecer su prioridad en ese y otros dominios.

Hooke descubrió los principios de la mecánica y la ley del inverso del cuadrado de la fuerza de la gravedad, no de una manera cualitativa o intuitiva, sino partiendo de observaciones y experimentos de sistemas mecánicos que constituían una adecuada analogía con la dinámica celeste. Muy estudiado el ejemplo del movimiento de un péndulo circular o cónico, hay pruebas también de que estudió la dinámica de las bolas rodantes en el seno de distintas superficies de revolución. Su trabajo con los muelles le condujo en 1678 a su ley sobre la elasticidad (ley de Hooke): "Ut tensio sic vis" o "la potencia de cualquier cuerpo de tipo resorte se halla en la misma proporción con la extensión".

Otro error que se desvanece proclama a Alfred Russel Wallace (1823-1913) mero apéndice, autodidacta, de Darwin en el descubrimiento de la teoría de la evolución. No recogido todavía por los libros de referencia (*The Alfred Russel Wallace Reader. A Selection from the Field* y *The Life of Alfred Russel Wallace. The Heretic in Darwin's Court*), comienza a emerger una figura científica de notable madurez a los veinte años. Me refiero a la recuperación reciente de un artículo inédito suyo, escrito en 1843 y enviado a William Henry Fox Talbot, donde propone emplear mercurio en la manufactura de lentes planas y curvas. Por esa época, en que Talbot era una figura respetada en ciencia y famoso por su invención de la fotografía, Wallace dominaba los principios básicos de la óptica, topografía, geodesia y astronomía. Y ello, pese a haberse visto obligado a abandonar la escolarización a los 13 años.

Hasta 1850 no apareció su primera publicación, dedicada a la caracterización de un ave del Amazonas. Consagró doce años de su vida a la exploración científica en los trópicos orientales y occidentales. No le sedujo nunca la fama, ni se amilanó ante la controversia. Discrepó abiertamente de Darwin en dos aspectos fundamentales: la selección sexual y el origen de la mente humana. Si acaso, y es sospecha del crítico, durante muchos años no supo desprenderse del complejo de inferioridad ante los prohombres de la ciencia natural victoriana, hasta el punto de renunciar a la defensa de su primacía sobre la teoría de la evolución por un reconocimiento de Darwin de su labor. Cierto es que su prestigio se vino abajo, apenas despuntado, por sus teorías políticas utópicas, su adscripción al espiritismo, la frenología y el mesmerismo, o la defensa de la vida en Marte.

De acuerdo con la tesis oficial, Darwin había venido trabajando veinte años en la teoría desarrollada en *The Origin of Species* (1859), cauteloso y metódico en la acumulación de datos que respaldaran unas ideas que socavarían los cimientos de la sociedad; no había una creación originaria de todas las especies, cada una por separado, sino que habrían venido surgiendo unas de otras por

selección natural de los individuos más idóneos o aptos, vencedores en la lucha por la supervivencia. De acuerdo con la historiografía canónica, sólo dos amigos suyos conocían sus lucubraciones, el botánico Joseph Hooker y el geólogo Sir Charles Lyell. Lucubraciones que habrían de tomar forma en una obra de varios volúmenes bajo el título único de "Selección Natural". Pero en junio de 1858, Darwin recibió un paquete remitido de la isla de Ternate, en las Indias Holandesas Orientales, un ensayo de Wallace, con quien había mantenido correspondencia tres años antes.

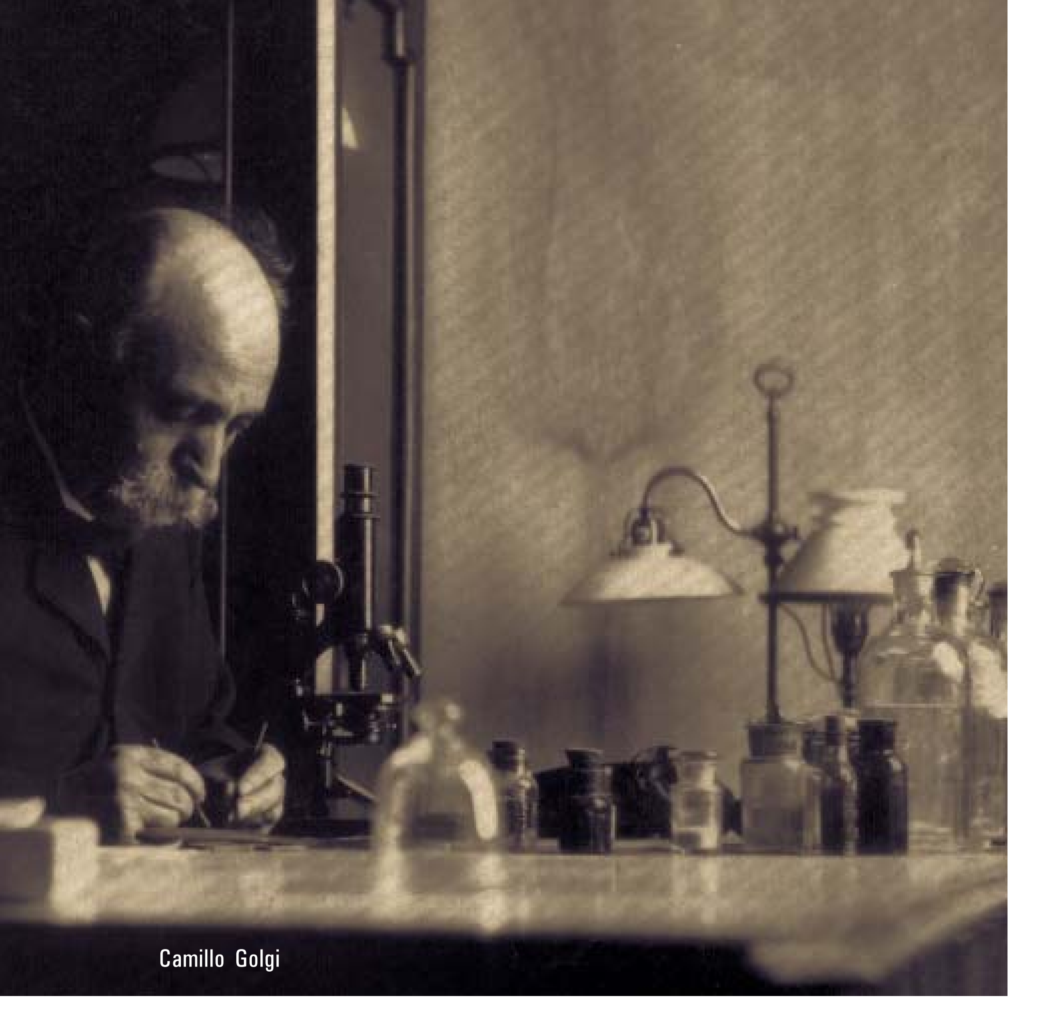
El escrito versaba *On the Tendency of Varieties to Depart Indefinitely from the Original Type*. En menos de una docena de páginas, enhebradas en torno a los conceptos de "lucha por la supervivencia", "ley de población de especies" y "adaptación a las condiciones de existencia", Wallace había perfilado, en trazos sucintos, la teoría de la evolución por selección natural y resuelto el enigma del origen de la diversidad específica. Según se dice, Darwin pasó el ensayo de Wallace a Hooker y Lyell, quienes se encargarían de abogar por su prioridad en la formulación de la tesis. Con ese fin, presentaron el ensayo de Wallace, con las anotaciones pergeñadas por Darwin, en la reunión de la Sociedad Linneana de Londres correspondiente al primero de julio de 1858. Las notas de Darwin constaban de un resumen de un manuscrito sobre selección natural que había redactado en 1844 y que sólo debería ver la luz si fallecía antes de que terminara su tratado magno, y del extracto de una carta remitida en septiembre de 1857 al botánico norteamericano Asa Gray, donde describía el principio de divergencia o de descendiente con modificación a partir de la especie parental. Se trataba, empero, del mismo principio que Wallace había anunciado en su ensayo "On the Law Which Has Regulated the Introduction of New Species", publicado en los *Annals and Magazine of Natural History*, que había pasado poco menos que inadvertido por los científicos ingleses, salvo para Lyell, quien le informó a Darwin, y del que no se hizo mención en la reunión de la Sociedad Linneana.

Con esos mimbres, Lyell y Hooker tejieron la sucesión de los hechos y proclamaron la prioridad de Darwin; la aportación de Wallace se presentaba como una ratificación observacional de la tesis evolucionista. No debió sentirse del todo tranquilo Darwin y preparó, de inmediato, un compendio del tratado previsto. Así, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* salió de tiros en noviembre de 1859, mientras Wallace se encontraba explorando en el archipiélago malayo. A su vuelta a Inglaterra en 1862, Wallace se convirtió en tenaz defensor de la teoría evolutiva, que aplicó en sus trabajos fundamentales de biogeografía, o sobre la distribución de los animales en el pasado y en la actualidad.

Wallace, que había desentrañado el fenómeno del mimetismo cromático y había ahondado en la etología, no compartía la convicción de Darwin de que la selección sexual constituyera una fuerza evolutiva determinante. Excluyó de la selección el origen de la humanidad y su racionalidad. Y rechazó su lamarckismo, o transmisión de los caracteres adquiridos que Darwin convirtió en piedra angular de su teoría de la herencia.

Aunque suele repetirse, sin fundamento, que Hooke y Wallace se labraron su propia ruina, sí cabe predicarse esa afirmación de Camillo Golgi (1843-1926), objeto de una biografía actualizada (*Il Nobel dimenticato*). Su obstinada oposición a la "teoría de la neurona" —el sistema nervioso está compuesto de unidades celulares independientes y recíprocamen-


Alfred Russel Wallace


Camillo Golgi

te conexas entre sí—, elaborada por Santiago Ramón y Cajal, terminó por obscurecer una fecunda investigación que dio un impulso extraordinario al desarrollo de la biología y la medicina. La teoría de la neurona se impuso a lo largo del siglo XX y se convirtió en el paradigma fundamental de las neurociencias, según se reconoció al concederles a ambos el premio Nobel, ahora hace un siglo.

Confirmada definitivamente tras el advenimiento del microscopio electrónico, la teoría de la neurona constituye uno de los ejemplos clásicos de transformación revolucionaria. Y la terquedad de Golgi, quien dedicó incluso parte de su discurso de recepción del Nobel a atacarla. Una paradoja cruel, pues con su método, la *reazione nera,* trabajó más que nadie para su asentamiento. El método de la impregnación cromoargéntica permite, en efecto, evidenciar en toda su complejidad la morfología de la célula nerviosa y la arquitectura basilar del tejido cerebral. No es raro en biología que un nuevo método transforme radicalmente un dominio de investigación y abra la puerta a la creación de otros nuevos. Pensemos en el impulso que supuso para la inmunología la introducción de los anticuerpos monoclonales, la misma técnica del ADN recombinante en el progreso de la genética o más recientemente la aplicación de las técnicas de formación de imágenes en neurociencias.

El 16 de febrero de 1873 Golgi escribía a un amigo suyo: "Paso muchas horas ante el microscopio. Me siento contento por haber dado con una reacción para demostrar al mundo las estructuras del estroma intersticial de la corteza cerebral. Dejo actuar el nitrato de plata sobre cortes de cerebro endurecidos en bicromato de potasio. Así he obtenido ya resultados bastante elegantes y espero obtener más". Antes de ese texto crucial en la historia de la ciencia, el sistema nervioso aparecía en el microscopio como una suerte de caja negra, de estructura imposible de conocer. Con el procedimiento de Golgi, de enorme sencillez, se ofreció de repente la posibilidad de penetrar en la morfología fina. La clave de bóveda del método de Golgi consistía en la sustitución del carmín o de la hematoxilina por nitrato de plata. Tras "fijar" el tejido en bicromato de potasio (2,5 %) por un período de duración variable (de uno a 45 días y a veces incluso más), sometía la preparación a una prolongada inmersión en una solución de nitrato de plata (0,5-1 %). Las preparaciones así tratadas se deshidrataban luego y se seccionaban sin inclusión; los cortes muy espesos (de 100 o más micrometros) se aclaraban en trementina y recubrían de un extracto de resina. El cromato de plata "impregnaba" de negro las células nerviosas con todas sus prolongaciones, destacando así sobre un fondo amarillo. La silueta de las neuronas aparecía con sus contornos bien definidos.

La teoría de la neurona no fue el único asunto polémico entre Golgi y Cajal. A comienzos de 1890, el italiano dio ya muestras de preocupación por el eco que estaba adquiriendo en Alemania la cruzada que encabezaba Ramón y Cajal contra el reticularismo por él defendido. (El reticularismo veía en el sistema nervioso una red difusa.) No le había prestado hasta entonces especial atención al español, enfrascado como estaba en sus trabajos sobre paludismo y el ciclo biológico del plasmodio. Pero cuando recibió el número de *Anatomischer Anzeiger* que contenía un artículo de Cajal sobre el origen y la ramificación de las fibras nerviosas en la médula espinal embrionaria, se percató del peligro que encerraba aquel obscuro investigador de una España que presumía obscura. El artículo reflejaba como suyo el descubrimiento de las fibras colaterales de la médula espinal, sin hacer mención del trabajo que Golgi había publicado diez años antes, en el que idéntico hallazgo se explicaba sucintamente. Al describir las fibras colaterales de la médula, Cajal sostenía que terminaban en la sustancia gris "entre les cellules des cornes antérieures et postérieures par une arborisation livre et notablement variqueuse" y no, como había sostenido Golgi, en la red nerviosa difusa. La prioridad de la descripción de las fibras colaterales se convirtió en un *casus belli* para Golgi. Contado está en la mayoría de las biografías de Cajal cómo éste reconoció la prioridad de Golgi y por qué no pudo conocerla hasta después de redactar su trabajo.

—Luis Alonso





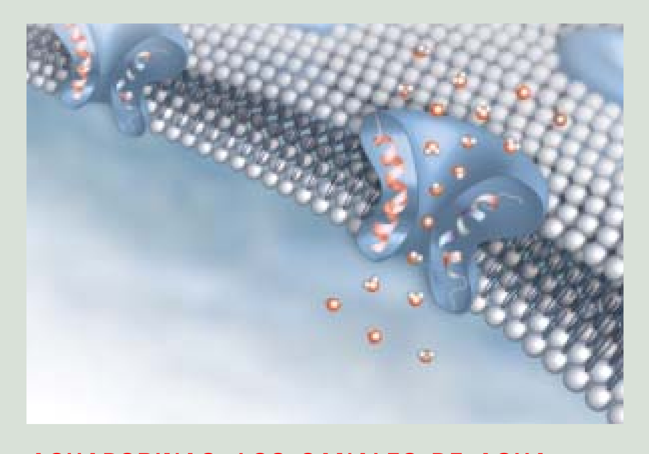
ASI EXPLOTA UNA ESTRELLA, por Wolfgang Hillebrandt, Hans-Thomas Janka y Ewald Müller

No es tan sencillo como parece. Tras años de refinamiento, los modelos de supernovas reproducen por fin este fenómeno.



INGENIERIA HIDRAULICA EN EL MEXICO PREHISTORICO, por S. Christopher Caran y James A. Neely

Los precursores de los aztecas construyeron, hace ya tres mil años, los primeros sistemas de gestión de recursos hidráulicos del Nuevo Mundo.



ACUAPORINAS: LOS CANALES DE AGUA CELULARES, por Miriam Echevarría y Rafael Zardoya

Las acuaporinas regulan el paso del agua a través de la membrana celular. Forman una familia de proteínas muy diversa; se hallan presentes en todos los seres vivos.

¿EXISTE UN FUTURO PARA LA ENERGIA NUCLEAR?, por José Antonio Tagle González

La viabilidad económica de la energía nuclear dependerá de las políticas energéticas que se adopten en los próximos decenios.

